



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ
OBCE VELKÝ BERANOV

HYDRAULIC ANALYSIS OF THE VELKÝ BERANOV WATER SUPPLY NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Kopecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN RUČKA, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Josef Kopecký
Název	Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Velký Beranov
Vedoucí práce	Ing. Jan Ručka, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] INGEDULD, P., 2003: Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET, DHI Water & Environment, 2003
- [2] Rossman, A. L., 2000: EPANET 2 Users Manual, United States Environmental Protection Agency US E.P.A., USA, 9/2000
- [3] National Research Council of the national academies, 2006: Drinking Water Distribution Systems – Assessing and reducing Risks, the National Academic Press, Wasington D.C., ISBN: 0-309-10306-1, 2006

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce bude vytvořen podrobný kvazidynamický hydraulický model celé vodovodní sítě obce Velký Beranov, okr. Jihlava, který bude následně kalibrován a verifikován na základě měření hydraulických veličin na vodovodní síti. Student provede simulaci charakteristických provozních stavů vodovodu a následně také posouzení tlakových poměrů s ohledem na stávající i výhledový rozsah zástavby. Bude-li to relevantní s ohledem na výsledky hydraulické analýzy, bude v modelu také simulováno opatření, které umožní dosažení optimálních tlakových poměrů v celé vodovodní síti. V úvodu prací bude proveden podrobný terénní průzkum spotřebiště.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na hydraulickou analýzu vodovodní sítě obce Velký Beranov v okrese Jihlava. Byl vytvořen podrobný kvazidynamický hydraulický model celé vodovodní sítě, který byl následně kalibrován a verifikován na základě měření hydraulických veličin na vodovodní síti. Ke kalibraci modelu byla využita numerická metoda nejmenších čtverců. Simulační model znázorňuje chování vodovodní sítě během charakteristických provozních stavů vodovodu. V rámci navazujících analýz bylo provedeno posouzení tlakových poměrů s ohledem na stávající i výhledový rozsah zástavby daný platným územním plánem obce.

KLÍČOVÁ SLOVA

hydraulická analýza, vodovodní síť, posouzení tlaků, model řízený odběrem, model řízený tlakem

ABSTRACT

The thesis is focused on hydraulic analysis of water supply network of the Velký Beranov in Jihlava district. A detailed quasi-dynamic hydraulic model of the water supply network was created, and then subsequently calibrated and verified on the basis of measurement of hydraulic quantities on the water supply network. The least squares numerical method was used to calibrate the model. The simulation model illustrates behavior of the water supply network during the characteristic operating conditions of the water supply. The follow-up analyzes carried out assessment of the pressure ratios with respect to the existing and future development given by the zoning plan.

KEYWORDS

hydraulic analysis, water network, pressure ratios, demand driven model, pressure driven model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Josef Kopecký *Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Velký Beranov*. Brno, 2019. 63 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Jan Ručka, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Velký Beranov* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

Josef Kopecký
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Hydraulická analýza vodovodní sítě obce Velký Beranov* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Josef Kopecký
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Ručkovi, Ph.D., vedoucímu této bakalářské práce, za čas, který mi věnoval při konzultacích a za jeho cenné rady.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	HYDRAULICKÉ MODELÝ.....	11
2.1	Základní vztahy tlakového proudění.....	11
2.1.1	Bernoulliho rovnice	11
2.1.2	Ztráty třením	12
2.1.3	Zjednodušující předpoklady.....	12
2.2	Rozdělení modelů	13
2.2.1	Modely řízené odběrem (DDA)	14
2.2.2	Modely řízené tlakem (PDA).....	15
3	HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE VELKÝ BERANOV ..	19
3.1	Zájmová oblast Velký beranov	19
3.1.1	Popis obce.....	19
3.1.2	Občanská vybavenost	20
3.2	Vodovod obce Velký Beranov	20
3.2.1	Zdroj vody	20
3.2.2	Úprava vody.....	21
3.2.3	Vodojemy	22
3.2.4	Spotřebišť obce Velký Beranov.....	23
3.2.5	Vlastníci a provozovatelé.....	25
3.2.6	Analýza průtoků.....	25
3.3	Měrná kampaň na vodovodní síti	28
3.3.1	Terénní průzkum.....	28
3.3.2	Měření.....	29
3.3.3	Měřicí zařízení	31
3.3.4	Výsledky měření	31
3.4	Tvorba modelu	34
3.4.1	Topologie.....	34
3.4.2	Výškopis	35
3.4.3	Objekty na vodovodní síti.....	35
3.4.4	Zadání uzlových odběrů.....	36
3.5	Kalibrace a verifikace modelu	36
3.5.1	Kalibrace.....	36
3.5.2	Metoda nejmenších čtverců	37
3.5.3	Výsledky kalibrace	40
3.5.4	Verifikace	40
3.6	Posouzení rychlosti proudění	41
3.7	Posouzení stávajících tlakových poměrů	42
3.7.1	Maximální hydrostatický tlak	43
3.7.2	Minimální hydrodynamický tlak.....	45
3.8	Posouzení tlakových poměrů s ohledem na výhledový stav zástavby.....	47
3.8.1	Návrh opatření pro optimalizaci tlakových poměrů ve vodovodní síti	47
3.8.2	Maximální hydrostatický tlak	49

3.8.3	Minimální hydrodynamický tlak.....	51
4	ZÁVĚR	53
5	POUŽITÁ LITERATURA.....	54
	SEZNAM TABULEK	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	60
	SEZNAM PŘÍLOH	62
	SUMMARY	63

1 ÚVOD

Modelování je zjednodušené zobrazení reálného světa. Míra zjednodušení ovlivňuje výslednou přesnost, která je chápána jako míra souhlasu mezi chováním modelu a skutečností. Matematické modely jsou již v jisté míře všude kolem nás. K jejich rozvoji došlo, díky rozvoji výpočetní techniky. Používají se v předvídání různých procesů, jevů, stavu společenstev a pronikly i do hydrauliky tlakových trubních sítí. [1]

Hydraulické modely vodovodních sítí mohou sloužit k různým účelům. Od projektování nových trubních rozvodů, přes jejich provozování, včetně případných rozšiřování, až po jejich rekonstrukce. Měřením přímo na síti se dají získat informace o tlakových poměrech a průtocích v místě měření, ale k získání těchto údajů pro celou síť by bylo nutné osadit na síti velké množství měřících zařízení. To je technicky proveditelné, ale ekonomicky velmi náročné. Hydraulické modely tak sice poskytují méně přesné informace, než přímé měření, za to ale podávají informace o celé síti. [2]

Cílem práce bylo vytvořit kvazi-dynamický hydraulický model vodovodní sítě obce Velký Beranov. Model byl kalibrován a verifikován na základě měření na síti. S využitím modelu bylo provedeno posouzení tlakových poměrů s ohledem na stávající i výhledový stav, dle vyhlášky 428/2001 Sb. Pro nevyhovující úseky potrubí byla navržena vhodná opatření.

2 HYDRAULICKÉ MODELÝ

Cílem hydraulické analýzy je získání potřebných informací o tlakových a průtokových poměrech v těchto sítích zejména pro potřeby provozování a řízení stávajících distribučních systémů, projektování nových trubních rozvodů a také pro potřebu jejich rekonstrukcí, případné rozšiřování a napojování nových odběratelů. Měření přímo na síti sice umožňuje získat informace o průtokových a tlakových poměrech přímo v místě měření, ale k získání těchto údajů pro celou síť by bylo nutné osadit na síti velké množství měřících zařízení. To je sice technicky proveditelné, ale ekonomicky náročné.

Velmi vhodné je používat k získání informací o průtokových a tlakových poměrech v síti hydraulický simulační model, který je verifikován a zkalibrován na základě výsledků měření na skutečné síti ve vhodně a účelně zvolených bodech. Tento způsob poskytuje sice méně přesné informace než přímé měření, podá však informace o celé síti. [2]

2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY TLAKOVÉHO PROUDĚNÍ

Tlakové proudění v uzavřených profilech, především v potrubí, je takové, když voda protéká plným průřezem a v každém místě je tlak různý od atmosférického. Příkladem je potrubí, kterým se vede voda z vodojemu ke spotřebiteli. Tlakové poměry ukazuje tlaková čára, která udává ve všech profilech potrubí hodnotu tlakové výšky a tím i úroveň volné hladiny. [3]

2.1.1 Bernoulliho rovnice

Tato rovnice vyjadřuje zákon zachování mechanické energie proudu ideální kapaliny. Lze říci, že součet polohové, tlakové a rychlostní energie příslušející jednotce tíhy průtoku ideální kapaliny je stálý pro všechny průřezy.

Při pohybu vazké kapaliny dochází ke tření o stěny potrubí a ke vnitřnímu tření v kapalině. Část energie se tak přemění v energii jinou, převážně tepelnou. Z hydraulického hlediska je takováto přeměna ztrátou a značíme ji h_z . Bernoulliho rovnice pro skutečnou, nestlačitelnou kapalinu, u které ale uvažujeme vnitřní tření má tvar. [3]

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_z \quad (2.1)$$

Kde: h ...výška profilu

p ...tlak [Pa]

ρ ...hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

α ...Coriolisovo číslo

$v \dots$ rychlost kapaliny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

$h_z \dots$ ztrátová výška

2.1.2 Ztráty třením

Vodovodní potrubí uvažujeme jako hydraulicky dlouhé, proto v něm zanedbáváme místní ztráty a uvažujeme pouze ztráty třením po délce. Toto tření vzniká po délce proudu, třením jednotlivých vrstev kapaliny a třením kapaliny o stěnu potrubí. Ztráta třením je větší, čím je potrubí delší. [3]

2.1.3 Zjednodušující předpoklady

Přesnost matematického modelu je závislá na přesnosti vstupních parametrů. Jde o to, s jakou přesností jsme schopni fyzikálně popsat reálnou předlohu modelu, na výběru vhodných matematických postupů a vzorců. Popsat některé děje může být velice náročné a zdlouhavé, proto se nevyhneme jejich zjednodušení. Míra zjednodušení určuje míru přesnosti modelu. [1]

Předpoklad stacionarity

Jedná se o častý typ zjednodušení. Používá se v případě, kdy je změna okrajových podmínek a dalších parametrů modelu v čase malá. Neovlivní tak charakter proudění. Tohoto zjednodušení tak využíváme i při tvorbě modelu vodovodní sítě, kdy se teplota vody v potrubí nebo topologie sítě v čase nemění. Předpokladu stacionarity lze využít i v případě, kdy nemáme dostatek časoprostorových dat z měření pro spolehlivou kalibraci a verifikaci modelu. [1]

Snížení rozměrovosti úlohy

Známe-li předpokládaný směr a charakter proudění, je možné zanedbat složky vektoru rychlosti v některém ze směrů. Snížením rozměrovosti úlohy snížíme náročnost na výkon výpočetní techniky. Při modelování vodovodních a kanalizačních sítí používáme jednorozměrné schematizace. U těchto sítí zanedbáváme složky vektoru rychlosti kolmé na osu potrubí. [1]

Tvar a rozměry náhradní oblasti

Tvar oblasti, kterou modelujeme, může být ve skutečnosti velmi geometricky složitý. V závislosti na použitém postupu při tvorbě modelu, může být nutné tvar řešené oblasti zjednodušit. Menší přesnosti lze dosáhnout při nedostatečném počtu uzlů a dělení řešené oblasti. Můžeme se také setkat s nepřesnými, nebo málo podrobnými podklady, které nepříznivě ovlivňují výslednou přesnost modelu. [1]

Vlastnosti kapaliny

Základním médiem je ve vodním hospodářství voda. Nejčastější předpoklady pro vodu proudící v potrubí jsou:

- homogenita a izotropie vody
- nestlačitelnost
- konstantní hustota nezávislá na teplotě nebo množství nesených částic

2.2 ROZDĚLENÍ MODELŮ

Gravitační vodovodní síť je typicky složena z jednoho nebo více vodojemů, sítí potrubí a jednotlivých přípojek, prostřednictvím kterých jsou zajištěny odběry. V současnosti jsou 2 možnosti jak modelovat takové systémy. První možností jsou modely řízené odběrem (DDA). V těchto modelech má každý uzel zadanou velikost odběru a tato hodnota je konstantní, nezávislá na chování systému. Druhou možností jsou modely řízené tlakem (PDA). U nich je požadovaný odběr v každém uzlu funkcí tlaku v systému. [4]

Obě metody mají neoddiskutovatelnou hodnotu pro navrhování, provozování, diagnostiku a řízení vodovodní sítě. Nicméně, modely řízené odběrem jsou přesnější pro tzv. normální stavy na vodovodní síti. Zatímco modely řízené tlakem se více hodí při situacích, kdy dochází ke změně tlaku vlivem změny odběru ze sítě, tedy při mimořádných stavech. [5]

Tab. 1 Příklady normálních a mimořádných stavů na vodovodní síti [7]

Stav	Využití vody	Příklad
normální	Přítok = Spotřeba (odběr)	Střednědobé a dlouhodobé plánování a provozování vodovodní sítě
	Přítok = Spotřeba + Ztráty vody	Analýza vodovodní sítě zahrnující obvyklé ztráty vody v potrubí
mimořádný	Přítok = Spotřeba + Ztráty vody	Analýza vodovodní sítě s dominantním únikem vody
	Přítok < Spotřeba	Nedostatek dodávek vody v důsledku sucha nebo zvýšeného odběru vody
	Přítok < Spotřeba + Ztráty vody	Porucha potrubí

Během stavů vodovodní sítě, kdy mimořádně narostou odběry, například z důvodu požárního odběru, nebo kvůli poruše potrubí, mohou být tlaky v některých uzlech příliš nízké pro zajištění potřebného odběru. Běžné modely založené na analýze řízené odběrem předpokládají, že tlak v potrubí je dostatečný a potřebný průtok je zajištěný. Ve skutečnosti však nároky převyšují kapacitu. To způsobí, že analýza řízená odběrem začne dávat zkreslené

výsledky, například záporné tlaky. Proto je pro mimořádné stavy vhodnější používat novější metodu, analýzu řízenou tlakem. [6]

Tab. 2 Použití modelů řízených odběrem (DDA) a modelů řízených tlakem (PDA)

Metoda	DDA	PDA
použití	normální stavy	normální a mimořádné stavy
spolehlivost analýzy při normálních stavech	vysoká	vysoká
spolehlivost analýzy při mimořádných stavech	nízká	vysoká
předpoklad	odběr je vždy uspokojen	přítok v každém uzlu a ztráty v potrubí jsou závislé na tlakové výšce v uzlu a na trubní síti
nevýhody	nerealistické výsledky, jako záporné tlaky, u použití této metody při mimořádných stavech	vztah mezi tlakovou výškou a přítokem je potřeba v každém uzlu, stejně jako vztah mezi tlakem a ztrátami vody v potrubí

2.2.1 Modely řízené odběrem (DDA)

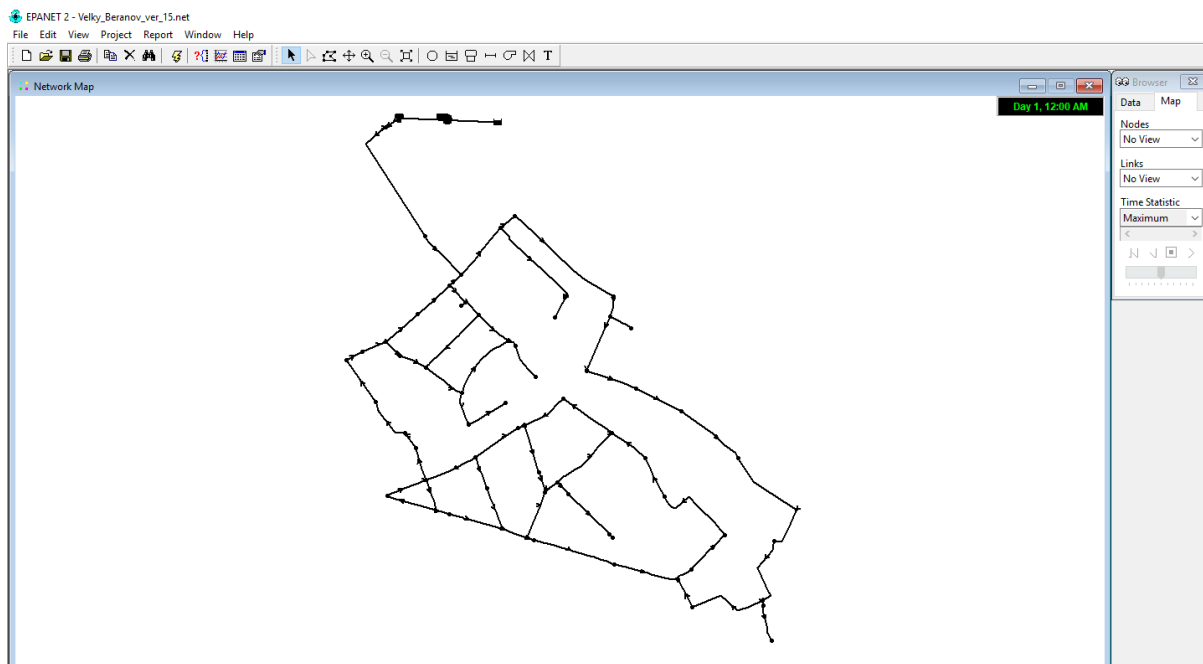
Analýza stálého proudění vody je velmi komplikovaná. Systém zásobování vodou se skládá z různých zařízení, jako je potrubí, vodojemy, ventily a tlakové stanice. Analýza vodovodní sítě se provádí za pomoci základní rovnice založené na zákonech proudění vody v potrubí. Tato rovnice se skládá z rovnice kontinuity, která je založená na zákonu zachování hmoty, dále se skládá ze zákona zachování energie a z rovnice hybnosti dle Newtonova druhého pohybového zákona. [7]

Modely řízené odběrem používají obecnou gradientní metodu a jsou používány na určení přetlaku s ohledem na to, že odběr vody je známá hodnota zadaná do příslušného uzlu. Tato metoda umožňuje velmi rychle provést analýzu i rozsáhlých trubních sítí. Obecná gradientní metoda je obsažena například v programu Epanet, který je široce využíván na modelování hydraulických modelů vodovodních sítí. [8]

Epanet 2.0

Tento program byl vyvinut americkou agenturou na ochranu životního prostředí EPA. Program je volně šiřitelný a lze si ho stáhnout přímo z webových stránek agentury. Slouží k simulaci dějů v tlakových trubních systémech vodovodů, abychom byli schopni lépe porozumět pohybu vody v potrubí od vodojemu až ke spotřebiteli. Modely mohou být statické, pro okamžitý zatěžovací stav, nebo kvazi-dynamické, kde se sleduje časová řada s krokem nejčastěji v hodinách. Epanet zvládne také vypočítat koncentrace, například chloru

a stáří vody v potrubí. V programu je na výběr ze tří různých výpočtů tlakových ztrát způsobených třením. Těmito výpočty jsou: Hazen-Williams, Darcy-Weisbach a Chezy-Manning.



Obr. 2.1 Pracovní prostředí programu Epanet 2.0

Mike Urban

Jedná se o software určený pro modelování vodovodních a stokových sítí. Tento program byl vyvinut skupinou DHI. Jeho nespornou výhodou oproti Epanetu je jeho uživatelská přívětivost a propojení s prostředím GIS. Mike Urban pracuje s modelem řízeným odběrem.

[9]

2.2.2 Modely řízené tlakem (PDA)

Rozlišujeme 2 typy odběrů v tlakem řízených modelech:

- Spotřeba – odběr domácností, průmyslu
- Ztráty – úniky netěsnostmi, poruchy

Pro tlakově závislou spotřebu uvažujeme, že dostupný odběr q_i^{avl} je spočítán na základě následující rovnice:

$$q_i^{avl}(P_i) = q_i^{req} \times \begin{cases} 1 & P_i \geq P_i^{ref} \\ \left(\frac{P_i - P_i^{min}}{P_i^{ref} - P_i^{min}} \right)^\alpha & P_i^{min} < P_i < P_i^{ref} \\ 0 & P_i \leq P_i^{min} \end{cases} \quad (2.2)$$

Kde: P_i^{ref} ...potřebný tlak k plnému uspokojení odběru q_i^{req}
 P_i^{min} ...minimální tlak, pod menším tlakem nemůže být voda do uzlu dopravena
 α ...exponent vztahu mezi tlakem a odběrem
 P_i ...aktuální tlak na uzlu i [5]

Dalším krokem je spočítání ztrát vody. Předpokládáme, že ztráty vody jsou přímo úměrné tlaku v potrubí. Mohou být vyjádřeny jako suma ztrát vody na pozadí a ztrát způsobených poruchou. Vztah tlaku a ztrát vody je tedy vyjádřen následovně:

$$q_k^{\text{leak}}(P_k) = \begin{cases} \beta_k l_k (P_k)^{\alpha_k} + C_k (P_k)^{\delta_k} & P_k > 0 \\ 0 & P_k \leq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Kde: q_k^{leak} ...celková ztráta vody po délce potrubí k
 l_k ...délka úseku
 α_k, β_k ...koeficienty ztrát vody únikem z potrubí
 C_k, δ_k ...koeficienty ztrát vody způsobených poruchou
 P_k ...průměrný tlak v potrubí k , průměr z přilehlých uzlů

Koeficient α_k nabývá hodnot od 0,5 do 2,5 podle typu úniku vody. Celkové ztráty vody v potrubí se rozdělí na dvě poloviny, každá polovina se přičte do přilehlého uzlu. Pro další výpočet se použije globální gradientní metoda.

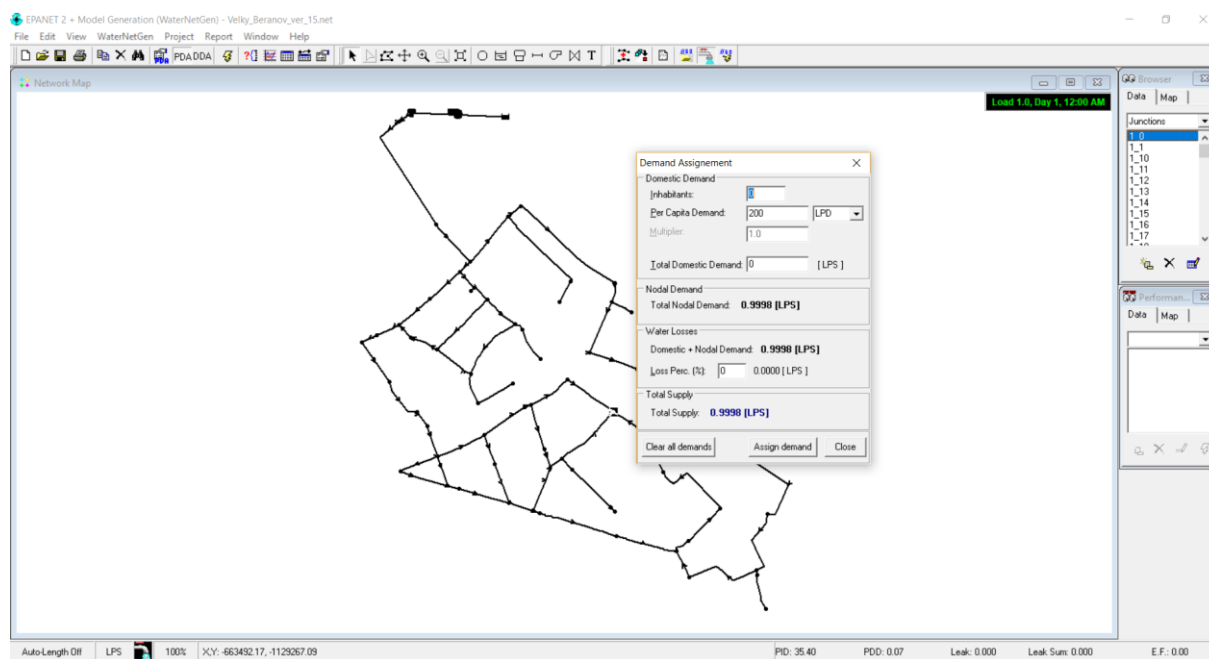
$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10} H_0 \\ -q^* \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Kde: q^* ...vektor odběrů a ztrát pro uzly s nedostatkem tlaku
 A_{22} ...diagonální matice, vztah: tlaková výška-odtok, tlak-ztráty
 Q ...neznámý průtok
 H ...neznámá tlaková výška
 H_0 ...známá tlaková výška
 A_{11} ...diagonální matice pro potrubí a čerpadla
 A_{12}, A_{21} ...matice definující napojení jednotlivých úseků na uzly
 A_{10} ...topologie pro uzly se známou tlakovou výškou

WaterNetGen

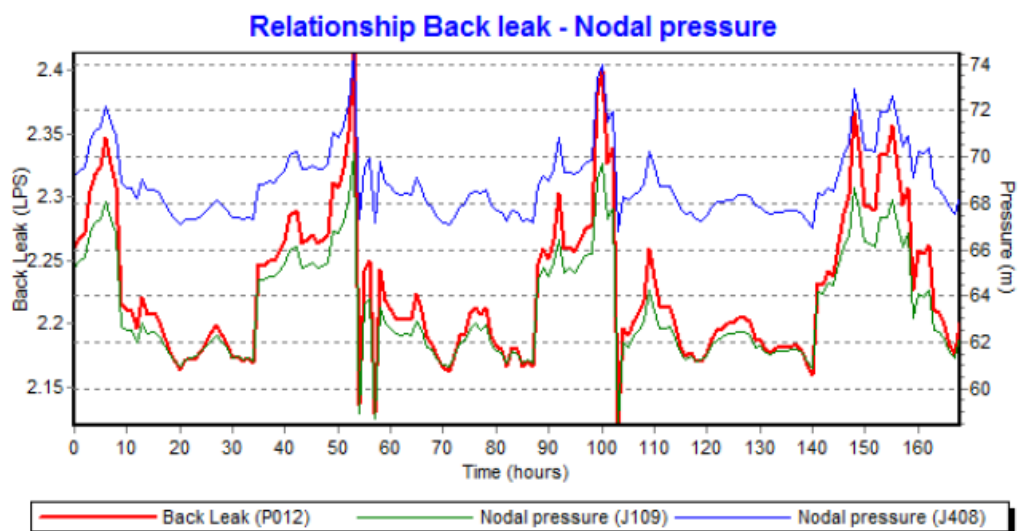
Epanet je jeden z nejrozšířenějších programů na modelování vodovodních sítí. V základu je Epanet software pracující s modely řízenými odběrem. Pomocí různých modifikací a rozšíření, je však možné v prostředí Epanetu pracovat i s modely řízenými tlakem. Jedním z těchto rozšíření je WaterNetGen.

Toto rozšíření přidává základnímu programu několik dalších možností. Kromě již zmíněné možnosti počítat modely závislé na tlaku, zde nově nalezneme například možnost generovat syntetické modely, katalog potrubí, nebo jednodušší zadávání odběrů. [5]



Obr. 2.2 Pracovní prostředí WaterNetGen

Pro model závislý na tlaku je potřeba do každého uzlu v programu zadat 3 parametry, p^{ref} , p^{min} a α . Referenční tlak je třeba zadávat opatrně, protože se může lišit uzel od uzlu. Ve WaterNetGen je referenční tlak zadáván uživatelem a vyjadřuje potřebný tlak podle počtu nadzemních pater okolních domů v kPa. [5]



Obr. 2.3 Závislost ztrát vody v potrubí na tlacích v krajních uzlech - výstup z WaterNetGen

WaterGEMS

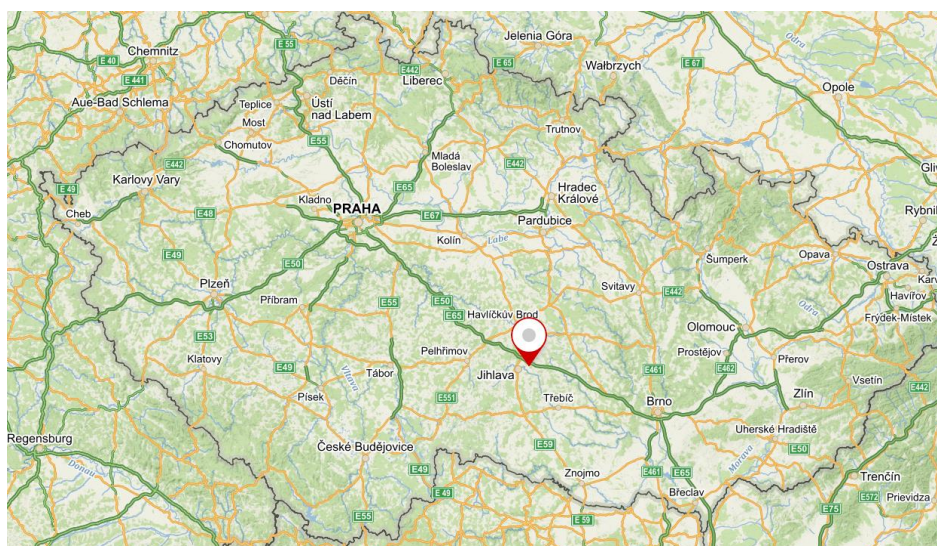
Další z řady programů určených na vytváření hydraulických modelů vodovodních sítí. Tento program však navíc umožňuje tvorbu jak modelů řízených odběrem, tak i tlakem. Možností je také oba typy modelů kombinovat a to i v rámci jedné vodovodní sítě. WaterGEMS k výpočtům využívá globální gradientní metodu. [10]

3 HYDRAULICKÁ ANALÝZA VODOVODNÍ SÍTĚ OBCE VELKÝ BERANOV

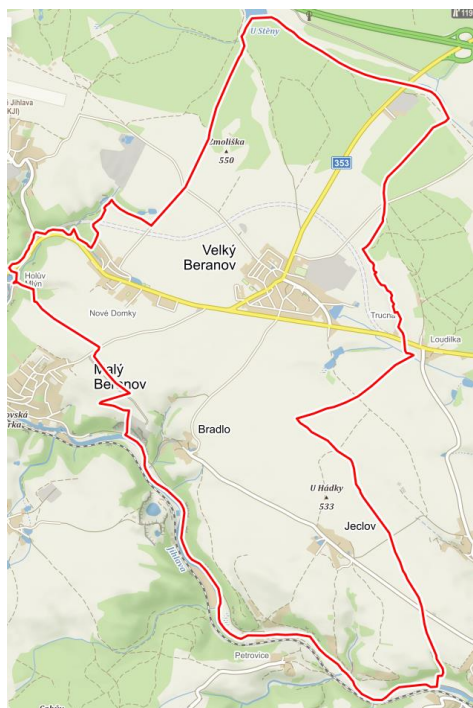
3.1 ZÁJMOVÁ OBLAST VELKÝ BERANOV

3.1.1 Popis obce

Obec leží v kraji Vysočina přibližně 6 km od krajského města Jihlava. Ve vzdálenosti 2,5 km od obce se nachází sjezd z dálnice D1, je zde také rozcestí silnic vedoucích mezi Žďárem nad Sázavou, Brnem a Jihlavou. Obec se dělí na místní části Velký Beranov, Nové Domky, Bradlo a Jeclov, k obci patří také dálniční cestmistrovství. Předmětem hydraulické analýzy vodovodní sítě je pouze místní část Velký Beranov. Katastrální výměra obce je 10,16 km². Počet obyvatel činil k 1.1.2018 1296 obyvatel. [11][12]



Obr. 3.1 Poloha Velkého Beranova v ČR



Obr. 3.2 Katastrální území obce Velký Beranov

3.1.2 Občanská vybavenost

Občanskou vybaveností se dle stavebního zákona 183/2006 Sb. rozumí stavby, zařízení a pozemky sloužící například pro vzdělávání a výchovu, sociální služby a péči o rodiny, zdravotní služby, kulturu, veřejnou správu a ochranu obyvatelstva. [13]

Mezi stavby občanského vybavení ve Velkém Beranově patří obecní úřad s knihovnou a zázemím pro místní sbor dobrovolných hasičů. Dále je zde kulturní dům, kde se konají plesy, vánoční trhy, výstavy a vystupují zde ochotnické spolky z okolí. Kapacita kulturního domu je 460 míst. Mezi největší odběratele vody v obci patří místní školka s kapacitou pro 50 dětí a škola, kterou navštěvuje 281 žáků. O základní potřeby obyvatel se starají 2 obchody se smíšeným zbožím a restaurace U Berana. V obci je také množství drobných podnikatelů, například pneuservis, autodíly, instalatérství a truhlářství. Největší firmou ve Velkém Beranově je zemědělské družstvo s rostlinou a živočišnou výrobou. [11][14]

3.2 VODOVOD OBCE VELKÝ BERANOV

3.2.1 Zdroj vody

Zdrojem vody pro spotřebiště Velký Beranov jsou 4 vrty v lokalitě Rytířsko. Tři z vrtů se nachází v zalesněné oblasti, čtvrtý je vzdálený jen několik desítek metrů od dálnice D1. V každém vrtu je umístěno čerpadlo, celková vydatnost vrtů je do $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Vrty jsou oplocené,

aby nedocházelo ke vniknutí nepovolaných osob. Z vrtů je voda přiváděna do úpravný vody společným výtlačným potrubím z materiálu IPE o průměru 160 mm.



Obr. 3.3 Podzemní vrty

3.2.2 Úprava vody

Budova úpravný vody se nachází v oploceném areálu společně s vodojemy. Surová voda nejprve prochází přes 2 tlakové filtry, každý o průměru 2000 mm. V nádržích je filtrační materiál Semidol K1. Jedná se o polovypálený dolomit. Tento materiál slouží k odkyselení podzemní vody. Dále dokáže vysrážet železo a mangan na příslušné hydroxidy. Po odkyselení prochází voda odradonovací věží. Jedná se o nerezovou věž, kde je voda provzdušňována a dochází k odstranění nežádoucího radonu. Voda se na této úpravně nechloruje z důvodu dostatečné jakosti vody ze zdroje. Chlorové hospodářství je nicméně na úpravně vody nainstalované pro případ potřeby. Dvojice paralelně zapojených čerpadel poté tlačí vodu do vodojemu Velký Beranov Nový. Ve vstupní místnosti úpravný se nachází kontrolní panel, který sleduje výšky hladin podzemní vody ve vrtech, tlak a průtok v přiváděcím řadu, průtok přes filtry, stav hladiny ve vodojemu a průtok do spotřebiště.



Obr. 3.5 Úpravna vody



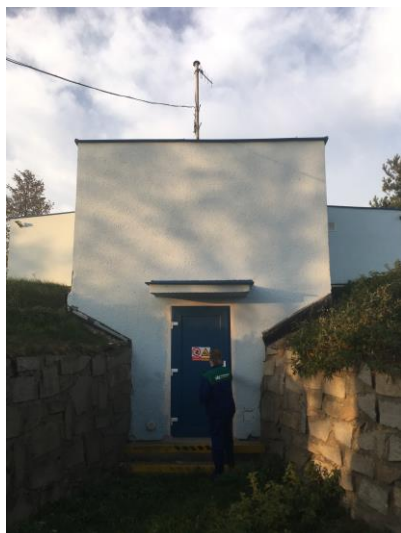
Obr. 3.4 Odradonovací věž 21

3.2.3 Vodojemy

Na kopci nad Velkým Beranovem se v areálu společně s úpravnou vody nachází 2 vodojemy. Nazývají se VDJ Velký Beranov Nový a VDJ Velký Beranov Starý.

VDJ Velký Beranov Nový

Tento vodojem je zásobován vodou z vrtů v lokalitě Rytířsko, upravenou na výše popsané úpravně vody. Vstup do vodojemu je zajištěn plastovými vstupními dveřmi, za nimi se nachází vstupní komora. Z ní je přístup po ocelovém žebříku dolů do armaturní komory, ve které se nachází přívodní a odběrné potrubí, dále přelivné potrubí, výpustné potrubí a jímka s odtokovým potrubím vedoucím ven z vodojemu. Všechna potrubí jsou osazena příslušnými šoupaty. Ze vstupní komory je také přístup do dvou naproti sobě umístěných kruhových akumulčních nádrží. Tyto vstupy jsou opatřeny plastovými dveřmi. Každá z nádrží má objem 250 m³. Kóta minimální hladiny je ve výšce 558,94 m n.m. Voda z vodojemu je odebírána potrubím IPE DN160. Vodojem Velký Beranov Nový zásobuje gravitačně spotřebiště Velký Beranov, které je předmětem hydraulické analýzy, vodojem v obci Kozlov, která je vzdálena od vodojemu Nový přibližně 3 km a vodojem Velký Beranov Starý, který se nachází v těsné blízkosti.



Obr. 3.6 Vstup do VDJ Nový

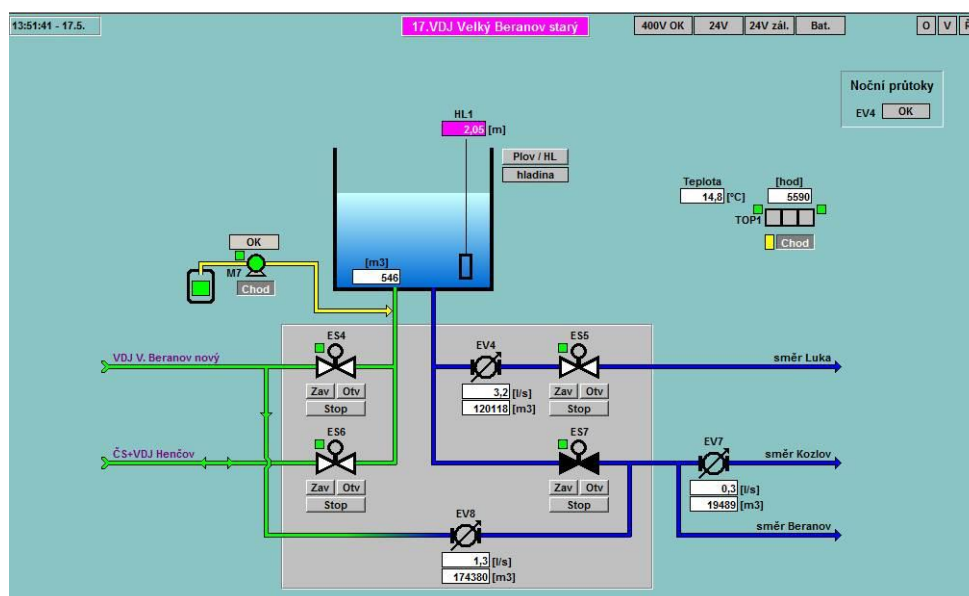


Obr. 3.7 Armaturní komora ve VDJ Nový

Vodojem Velký Beranov Starý

Do vodojemu Starý přitéká voda ze zdroje podzemní vody Rytířsko. V případě, že tento zdroj nezvládá dodávat dostatečné množství vody, je do vodojemu přiváděna také voda ze skupinového vodovodu Jihlava. Ve vodojemu poté dochází k mísení vod z obou zdrojů.

Voda do skupinového vodovodu Jihlava je čerpána z vodní nádrže Hubenov. Nádrž byla vybudována v letech 1968-1972 a její celkový objem je 3,37 mil. m³ vody. Povolený odběr z nádrže činí 160 l·s⁻¹. Voda z Hubenovské nádrže je poté čerpací stanicí odváděna do úpravní vody Hosov. V Hosově probíhá vícestupňová úprava vody zahrnující flokulaci, sedimentaci, filtraci, ozonizaci, ztvrdování a hygienické zabezpečení. Kapacita úpravní je 240 l·s⁻¹. Odtud se pak voda dostává přes Jihlavu a Henčov do VDJ Velký Beranov Starý. Vodojem je stejného uspořádání jako vodojem Nový, jeho celkový objem je 500 m³. Kóta minimální hladiny je o 3 cm níže než minimální hladina ve vodojemu Nový a to ve výšce 558,91 m n.m. Voda je odtud odváděna směrem do obce Luka nad Jihlavou. Po cestě zásobuje zbývající místní části Velkého Beranova a to Nové domky, Bradlo a Jeclov. VDJ Velký Beranov Starý nezásobuje místní část Velký Beranov a tak není zahrnut do hydraulické analýzy.



Obr. 3.8 Schéma VDJ Starý ze systému SCADA

3.2.4 Spotřebiště obce Velký Beranov

Nejvýše položeným objektem na vodovodní síti je vodojem Velký Beranov Nový, který svým umístěním udává tlakové poměry ve spotřebišti. Od vodojemu se terén postupně svažuje na jihovýchod, kde je nejnižší místo spotřebiště. Nejvýše postavená nemovitost připojená do vodovodní sítě je ve výšce 547 m n.m. Nejnižší postavená budova připojená na vodovodní síť ve Velkém Beranově je na kótě 516 m n.m. Výškový rozdíl zástavby tedy činí 31 m. V obci tak postačí jediné tlakové pásmo. Převládající typ zástavby je venkovský

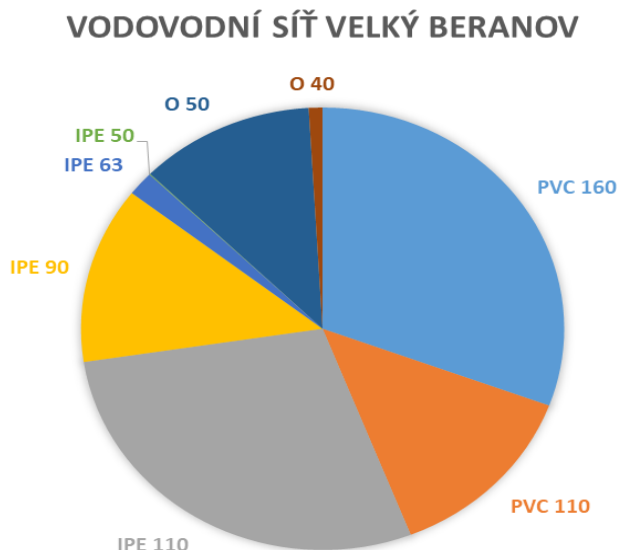
s rodinnými domy. V jižní části obce se nachází několik řadových domů do dvou nadzemních podlaží. Je zde také jeden bytový dům s 3.NP. Celkový počet domů připojených na vodovodní síť je 248.

Celková délka vodovodní sítě zahrnující zásobní řád a spotřebiště Velký Beranov je 5,2 km. Zásobní řád je postaven z PVC o průměru 160 mm. Převládajícím materiálem na vodovodní síti jsou plasty. Z PVC je rovných 44% potrubí v obci, jedná se o průměry 160 a 110 mm. Dalším rozšířeným typem potrubí je IPE o průměrech 110, 90 a 63 mm. 3 m potrubí jsou také z IPE DN50. V severozápadní části obce je položeno 661 m potrubí provedeného z oceli o průměrech 50 a 40 mm. Ve spotřebišti se nachází 31 hydrantů, které v případě potřeby zajišťují požární vodu z vodovodní sítě.

Tab. 3 Přehled jednotlivých materiálů a dimenzí

Materiál; DN	[m]	[%]
PVC 160	1601	30,6
PVC 110	701	13,4
IPE 110	1490	28,5
IPE 90	675	12,9
IPE 63	93	1,8
IPE 50	3	0,1
Ocel 50	613	11,7
Ocel 40	48	0,9
Délka celkem	5223	100

Graf 1 Procentuální zastoupení jednotlivých materiálů a dimenzí potrubí v obci



3.2.5 Vlastníci a provozovatelé

Vodovod v obci Velký Beranov byl od roku 1993 majetkem Svazu vodovodů a kanalizací Jihlavsko, zkráceně SVAK. Členy tohoto svazu byli desítky obcí na Vysočině a docházelo ke společnému hospodaření s majetkem vodovodů a kanalizací. V roce 2012 ze SVAKu vystoupilo krajské město Jihlava a pro stejný krok se koncem roku 2014 rozhodla i obec Velký Beranov, která je nyní vlastníkem vodovodu v obci.

Provozovatelem vodovodní sítě ve Velkém Beranově je Vodárenská akciová společnost, a.s. divize Jihlava se sídlem na adrese Žižkova 93, 586 29 Jihlava.

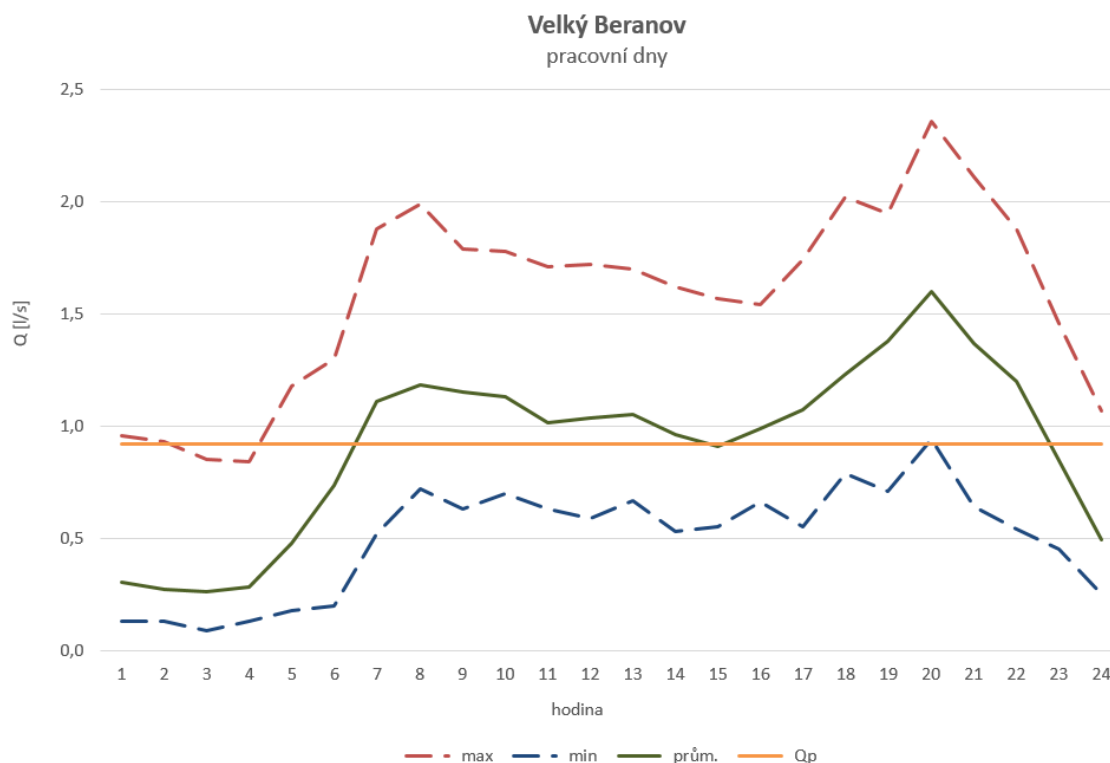
3.2.6 Analýza průtoků

Na odtoku z vodojemu Velký Beranov Nový jsou trvale osazeny průtokoměry, které zaznamenávají hodnoty průtoků v hodinách po celý rok. Průtokoměr EV8 zaznamenává celkový průtok do spotřebišť Velký Beranov a Kozlov. Další průtokoměr, EV7, měří průtoky pouze do spotřebiště Kozlov. Na zásobním řadu do Velkého Beranova žádný další průtokoměr osazen není, průtok do Velkého Beranova se tak musí vypočítat rozdílem dat z průtokoměrů, viz obr. 3.8.

$EV8 - EV7 = \text{průtok do spotřebiště Velký Beranov}$

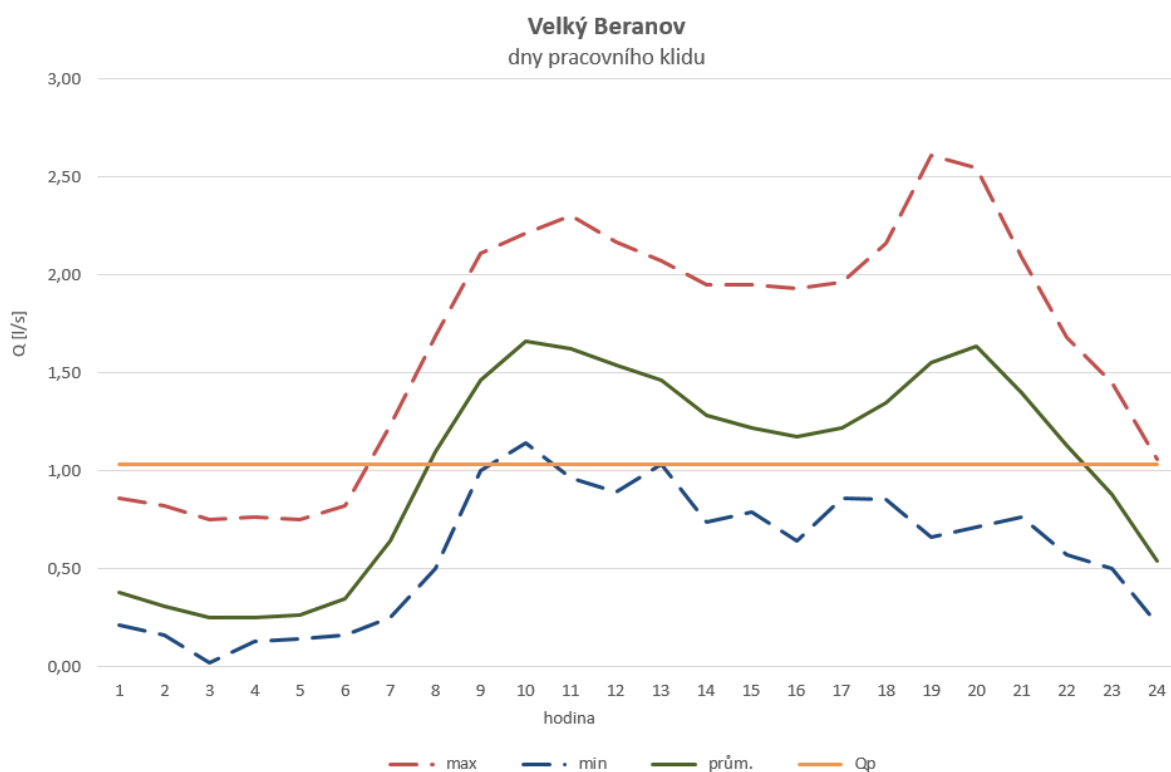
Data z těchto průtokoměrů byla poskytnuta provozovatelem vodovodní sítě. Zahrnují průtoky v jednotlivých hodinách za celý rok 2017. Data byla rozdělena podle toho, jestli se naměřily v pracovní dny, nebo ve dnech pracovního klidu. Těmito dny jsou víkendy a státní svátky. Poté byly průtoky statisticky zpracovány a byly z nich vytvořeny následující grafy, ukazující denní spotřebu vody.

Graf 2 Průběh spotřeby vody v pracovní dny



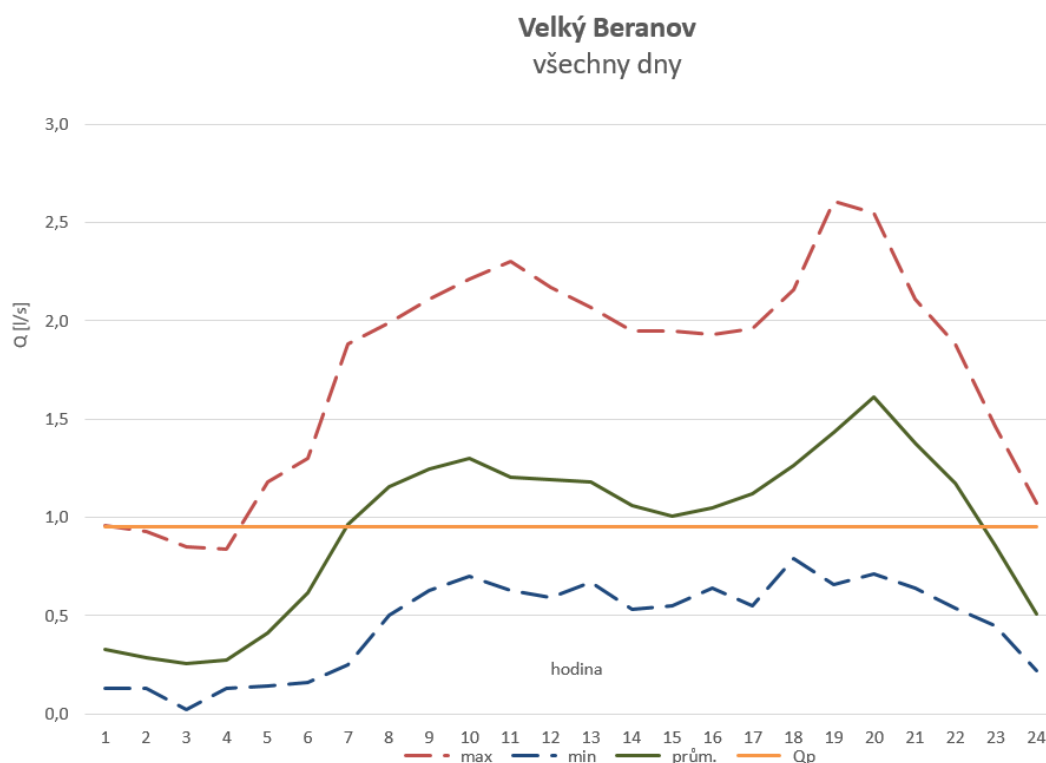
Graf pro pracovní dny ukazuje typický průběh spotřeby vody pro spotřebišť, kde je dominantním odběratelem obyvatelstvo. Nejnižší průtoky jsou mezi 3. až 4. hodinou. Ranní špička spotřeby vrcholí v 8 hodin, kdy se obyvatelé chystají do svých zaměstnání. Ve Velkém Beranově podstatná část obyvatel odjíždí za prací do nedaleké Jihlavy. Následuje mírný pokles spotřeby. Nejvyšší odběry vody z celého dne jsou ve 20 hodin, poté spotřeba opět klesá. Průměrná denní potřeba vody činí $0,92 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Graf 3 Průběh spotřeby vody v nepracovní dny



Průběh spotřeby vody v nepracovní dny se liší od průběhu spotřeby ve dny pracovní. Nejnižší průtoky jsou ve stejnou dobu, ale ranní špička odběru se posouvá až na 10. hodinu. Následuje větší pokles spotřeby. Večerní odběry nemají tak ostře daný maximální odběr jako v případě předchozího grafu. Největší odběry vody ze sítě se tak objevují mezi 19. až 20. hodinou. Průměrná denní potřeba vody je v nepracovní dny vyšší, než ve dny pracovní a činí $1,03 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Graf 4 Průběh spotřeby vody za všechny dny



Posledním grafem ukazujícím rozprostření spotřeby vody během dne je graf pro všechny dny v roce. Zahrnuje tak pracovní a nepracovní dny dohromady. Použitím této křivky do hydraulického modelu by vznikla 24. hodinová časová řada nerozlišující dny pracovní a nepracovní. Z důvodu odlišnosti spotřeby vody v obou typech dnů, bylo nakonec rozhodnuto zahrnout do hydraulického modelu zvlášť dny pracovní a nepracovní. Vznikne tak 48 hodin dlouhá časová řada, kde prvních 24 hodin bude simulovat odběry ve dny pracovní a druhých 24 hodin ve dny pracovního klidu.

3.3 MĚRNÁ KAMPAŇ NA VODOVODNÍ SÍTI

Měrná kampaň byla provedena v říjnu 2018 ve spotřebišti Velký Beranov. Měření se provádělo z důvodu potřeby skutečných naměřených hodnot na skutečné síti, aby bylo možné model vytvořený v softwaru kalibrovat. Naměřená data budou také použita na verifikaci, to znamená ověření pravosti dat vypočítaných v softwaru.

3.3.1 Terénní průzkum

Terénní průzkum proběhl 15. října 2018. Nejprve byla v plánu prohlídka úpravny vody. Ta upravuje vodu ze zdroje podzemní vody Rytířsko. Druhým objektem, do kterého bylo možno nahlédnout, byl vodojem Velký Beranov Nový. Celou prohlídkou provázal technický pracovník provozovatele vodovodní sítě, Vodárenskou akciovou společností divize Jihlava.

Následoval přesun do spotřebiště Velký Beranov. Zde bylo provedeno vizuální ověření druhu, rozsahu a výšky zástavby. Během průzkumu byla zjištěná data pečlivě zapisována a byla pořízena fotodokumentace.

3.3.2 Měření

Samotnému měření předcházela výběr měřicí techniky a jejího vhodného umístění na vodovodní síti. Hodnoty průtoků za rok 2017 z průtokoměrů EV8 a EV7 poskytl provozovatel vodovodní sítě. Nebylo tedy nutné při měrné kampani osazovat další měřicí zařízení pro zaznamenávání průtoků do spotřebiště. Analýza průtoků byla provedena z dat poskytnutých provozovatelem vodovodní sítě.

Pro kalibraci a následnou verifikaci modelu bylo potřeba umístit do spotřebiště tlaková čidla. Jelikož se ve Velkém Beranově nachází pouze jedno tlakové pásmo, postačilo osazení dvou čidel. Bylo použito měřicí zařízení značky SEBA, tato tlaková čidla se umísťují do podzemních hydrantů. Před osazením čidla je potřeba nejprve ověřit funkčnost hydrantu. Poté se musí hrdlo hydrantu mechanicky očistit a provést propláchnutí hydrantu malým průtokem. Následně se může osadit čidlo. Správná funkčnost čidla je dána vodotěsným spojením. Toto spojení nesmí být porušeno ani při kolísání tlaků.



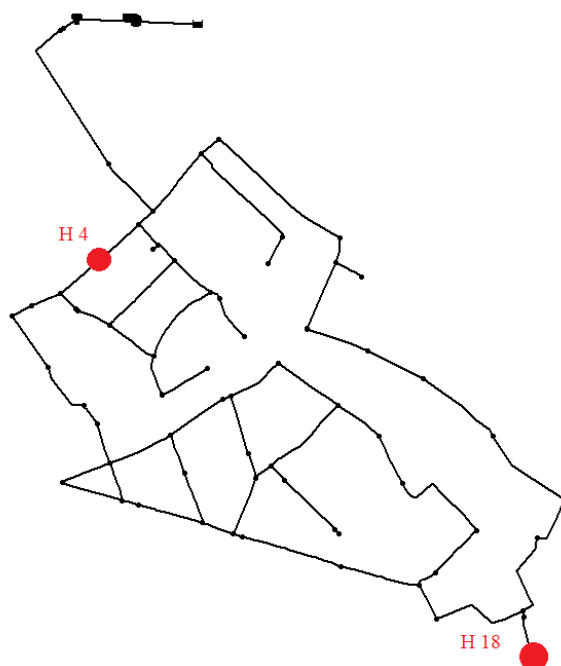
Obr. 3.10 Propláchnutí hydrantu



Obr. 3.9 Zakalená voda z hydrantu

První tlakové čidlo bylo umístěno na začátku spotřebiště, do nadmořské výšky 545,1 m n.m. Vsazeno bylo do hydrantu číslo 4. Před usazením čidla byl také změřen okamžitý tlak pomocí měřicího zařízení značky Baroli. Hodnota okamžitého tlaku byla naměřena 1,49 bar.

Pro umístění druhého tlakového čidla byl vybrán hydrant na druhé straně obce, konkrétně hydrant číslo 18. Nadmořská výška tohoto hydrantu činí 518,8 m n.m. I zde bylo provedeno měření okamžitého tlaku s výsledkem 4,09 bar.



Obr. 3.11 Situace umístění tlakových čidel na vodovodní síti – schéma sítě z hydraulického modelu



Obr. 3.12 Obě tlaková čidla umístěná v podzemních hydrantech

Měření tlaků probíhalo od pondělí 15. října 2018 do středy 24. října 2018. Díky tomu byly nasbírány údaje o tlacích celkem ze 7 pracovních a dvou nepracovních (víkendových) dní. Tato data dále sloužila ke kalibraci a verifikaci hydraulického modelu v softwaru Epanet 2.0.

3.3.3 Měřicí zařízení

Jako měřicí zařízení byla použita dvě tlaková čidla značky SEBA. Konkrétně se jednalo o loggery Sebalog P-3. Rozsah měření tlaků těchto zařízení je 0-25 bar, to je pro účely měření na síti Velkého Beranova naprosto dostačující. Čidla jsou vybavena zabudovanou lithiovou baterií, interní pamětí a bezdrátovým přenosem dat. Výdrž baterie činí až 5 let, paměť dokáže uložit až 1 milion hodnot. Maximální chyba měření je 1%. Frekvence záznamů je možné nastavit od 1 s po 24 hod. Pro měrnou kampaň ve Velkém Beranově byla nastavena frekvence 15 s. Každou hodinu tak bylo naměřeno 240 údajů o tlacích ve vodovodní síti. Z obou čidel bylo za dobu trvání kampaně získáno přes 104 000 záznamů. Pro prvotní zpracování dat byl použit software Sebadata view určený na analýzu naměřených dat přímo od společnosti SEBA. [15]

Jelikož jsou naměřené tlaky v jednotkách bar a model používá jednotky m v.sl., bylo nutné tyto jednotky sjednotit dle vztahu:

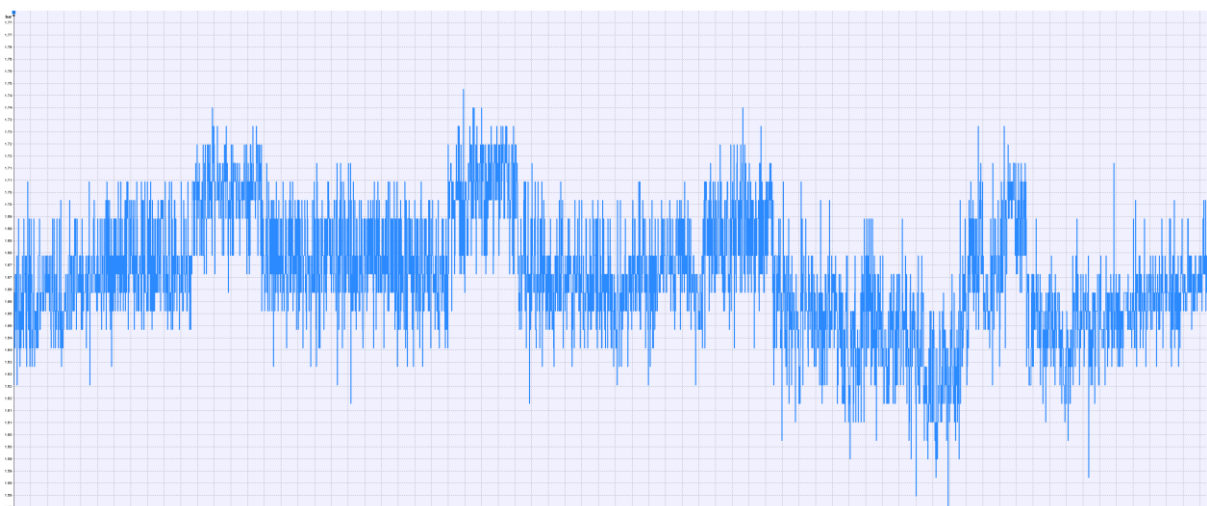
$$\text{Tlak [Pa]} = \text{hustota vody } 1000 [\text{kg} \cdot \text{m}^3] \cdot \text{tíhové zrychlení } 9,81 [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \cdot \text{výška vodního sloupce [m]}$$

$$\text{Např.: } 1 \text{ bar} = 0,1 \text{ MPa} = 10,19 \text{ m v. sl.}$$

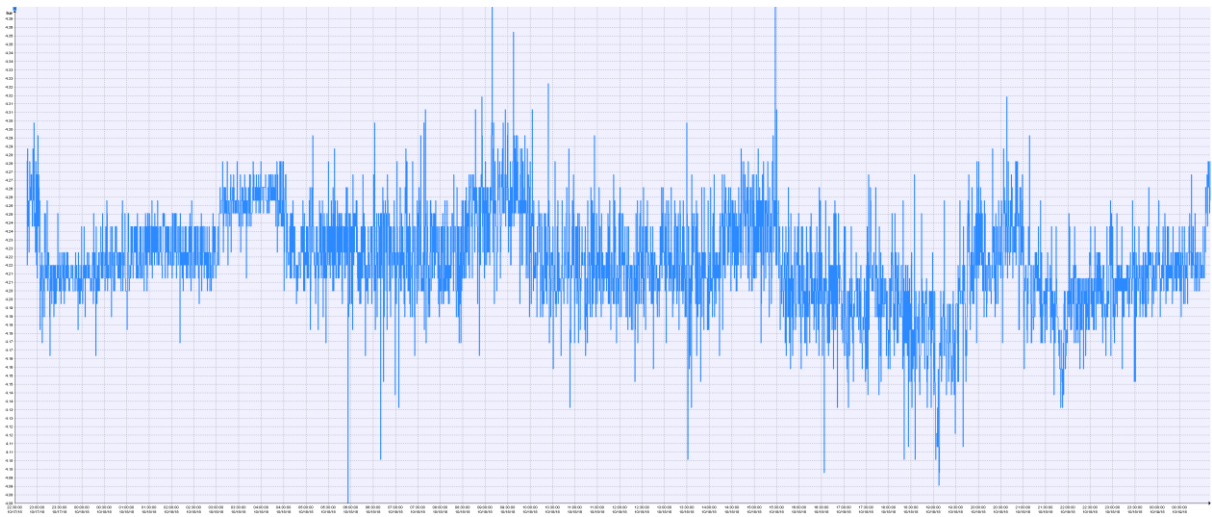
3.3.4 Výsledky měření

Průběh a výsledky měření byly zapsány do následujících formulářů. První je pro tlakové čidlo č. 183, umístěné do hydrantu č. 4, a druhý pro čidlo č. 205 umístěné do hydrantu č. 18, nacházejícím se na konci spotřebiště.

Tab. 4 Výstup z měrné kampaně pro čidlo č.183

Měřicí místo:	Hydrant č. 4 – potrubí z PVC DN160		
Tlakové pásmo:	VDJ Nový	Napájecí uzel:	VDJ Nový 2x 250 m ³
Měřidlo:	SebaLOG P-3 č. 183		
Měřené období:	15.10.2018 9:00 24.10.2018 11:00	Nadm. výška měřidla:	545,10 m n.m.
Vyhodnocení tlaků			
	Minimum	Průměr	Maximum
Tlak měřený [bar]	1,49	1,68	1,78
Datum, čas	21.10.2018 19:00:15		23.10.2018 4:39:15
	Neděle, večerní špička odběrů		Úterý, minimální noční průtok
			
Komentář k provedenímu měření:			
Vzorek měření z 18. 10. 2018 od 0:00 do 24:00, časový krok 15 s			

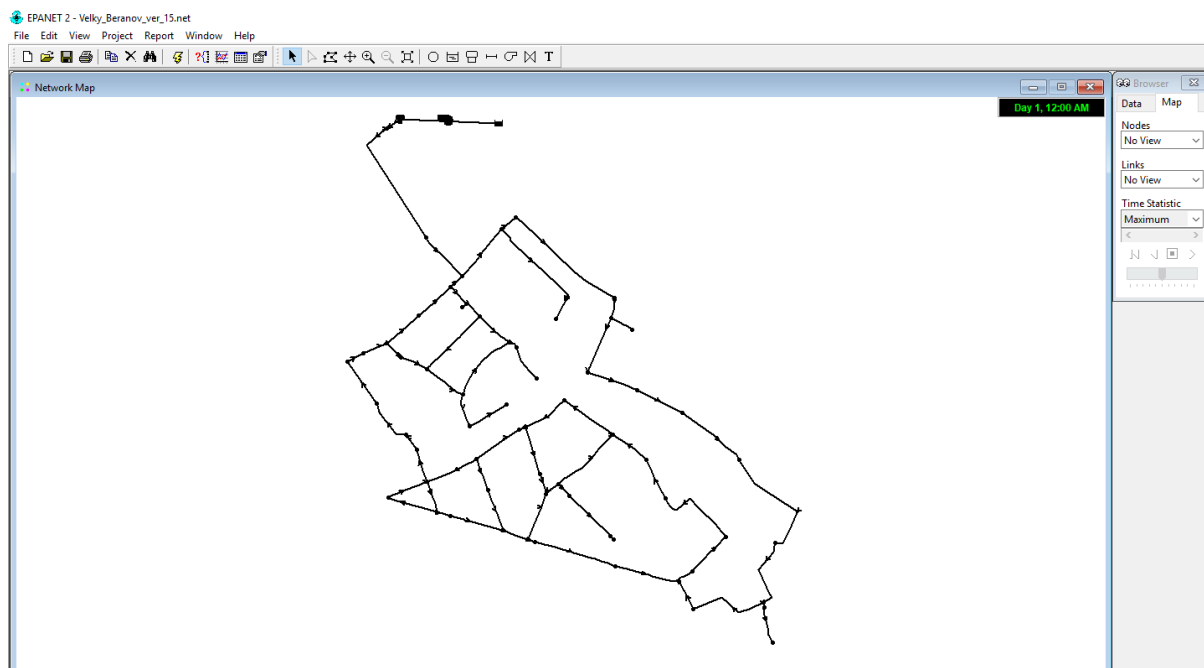
Tab. 5 Výstup z měrné kampaně pro čidlo č.205

Měřicí místo:	Hydrant č. 18 – potrubí z IPE DN90		
Tlakové pásmo:	VDJ Nový	Napájecí uzel:	VDJ Nový 2x 250 m ³
Měřidlo:	SebaLOG P-3 č. 205		
Měřené období:	15.10.2018 9:30 24.10.2018 12:00	Nadm. výška měřidla:	518,80 m n.m.
Vyhodnocení tlaků			
	Minimum	Průměr	Maximum
Tlak měřený [bar]	4,00	4,23	4,43
Datum, čas	21.10.2018 19:00:30		21.10.2018 8:22:15
	Neděle, večerní špička odběrů		neděle, minimální ranní průtok
			
Komentář k provedenému měření:			
Vzorek měření z 18. 10. 2018 od 0:00 do 24:00, časový krok 15 s			

Během kampaně nebyly detekovány žádné chyby nebo výpadky měření. Hodnoty naměřených tlaků dále poslouží ke kalibraci a verifikaci hydraulického modelu vodovodní sítě obce Velký Beranov.

3.4 TVORBA MODELU

Pro stavbu kvalitního hydraulického modelu je potřeba správně zvolit matematické řešení a co nejpřesněji popsat reálnou předlohu. Pro vytvoření hydraulického modelu Velkého Beranova byl použit software Epanet 2.0.



Obr. 3.13 Pracovní prostředí softwaru Epanet 2.0

3.4.1 Topologie

Soubor s topologií sítě obce Velký Beranov byl poskytnut provozovatelem sítě. Soubor obsahoval polohu vodovodního potrubí v souřadném systému JTSK, polohu všech objektů na síti a údaje o materiálu a průměru daného potrubí. Nyní bylo potřeba rozdělit vodovodní síť na jednotlivé úseky a uzly. Toto rozdělení bylo provedeno v programu AutoCAD za pomoci funkce křivka.

Uzly byly umísťovány vždy v místě spojení více řadů, dále na koncích vodovodních řadů, v každém hydrantu a v místě změny průměru nebo materiálu potrubí. Úseky, tedy křivky znázorňující potrubí, pak spojují jednotlivé uzly. Úseky by neměly být příliš dlouhé. Maximální délka úseku je 300 m, poté je vhodné rozdělit úsek uzlem. Uzly se neumísťují v místech napojení jednotlivých domovních přípojek.

Software Epanet 2.0 nepodporuje import topologie sítě. Proto byla data nejprve importována do programu Mike Urban, který tento import umožňuje. Odtud pak již lze topologii uložit ve formátu, který jde otevřít v Epanetu. Výhodou tohoto postupu je přesné zanesení topologie vodovodní sítě do Epanetu. Takto importovaná síť je již po předchozím

kroku v programu AutoCAD rozdělena na uzly a úseky. Úseky navíc už obsahují údaj o jejich délce a není tak třeba tento údaj ručně zadávat. Do modelu je nyní nutné zadat vnitřní průměr potrubí a hydraulickou drsnost potrubí pro úseky a nadmořskou výšku a odběry pro uzly.

U vnitřního průměru potrubí záleží na materiálu, z kterého je potrubí vyrobeno. Zastoupení jednotlivých materiálů ve Velkém Beranově je v tabulce 1. U oceli DN znamená už hodnotu přímo vnitřního průměru potrubí. U plastů je hodnota DN vztažena k vnějšímu průměru. Od této hodnoty je tak potřeba odečíst tloušťku stěn potrubí. Pro plasty tak byly zadávány následující hodnoty vnitřních průměrů.

Tab. 6 Vnitřní průměry plastových potrubí

Materiál	DN	Vnitřní průměr [mm]
PVC	160	147,6
PVC	110	101,4
IPE	110	96,8
IPE	90	79,2
IPE	63	55,4
IPE	50	44,0

Hodnoty hydraulických drsností jsou závislé na materiálu a stáří potrubí. Čím je potrubí starší, tím se drsnost jeho stěn zvyšuje. To je způsobeno vznikem usazenin a inkrustací. Do jednotlivých úseků jsou zadávány drsnosti podle White-Colebrooka. Tato drsnost je vyjádřena hodnotou k v mm. Největší drsnost z celého spotřebiště má potrubí z oceli, zde byla zadávána drsnost 2 mm. Naproti tomu plasty mají drsnost řádově menší. Hodnota drsnosti má vliv na ztráty třením po délce, které jsou v Epanetu počítány dle vztahu Darcy-Weisbach.

3.4.2 Výškopis

Výškopis byl opět poskytnut provozovatelem sítě. Jednalo se o podrobně zaměřené bodové pole Velkého Beranova. Nadmořské výšky pro uzly tak byly přímo odečítány, případně byly pro výšku uzlu lineárně interpolovány nejbližší zaměřené body. Do uzlů se ručně zadává nadmořská výška v jednotkách m n.m. Jedná se o výšku terénu.

3.4.3 Objekty na vodovodní síti

V modelu se kromě klasických uzlů vyskytují i objekty na síti. V případě Velkého Beranova jde o vodojem Velký Beranov Nový. Místo uzlu je zde vložen objekt „tank“. Do něj je nutné zadat nadmořskou výšku dna v m n.m., objem a poté minimální a maximální hladinu v metrech nad nadmořskou výškou dna. Epanet počítá i s plněním a prázdněním vodojemu, proto je důležité zadat i počáteční hladinu v akumulacích nádržích.

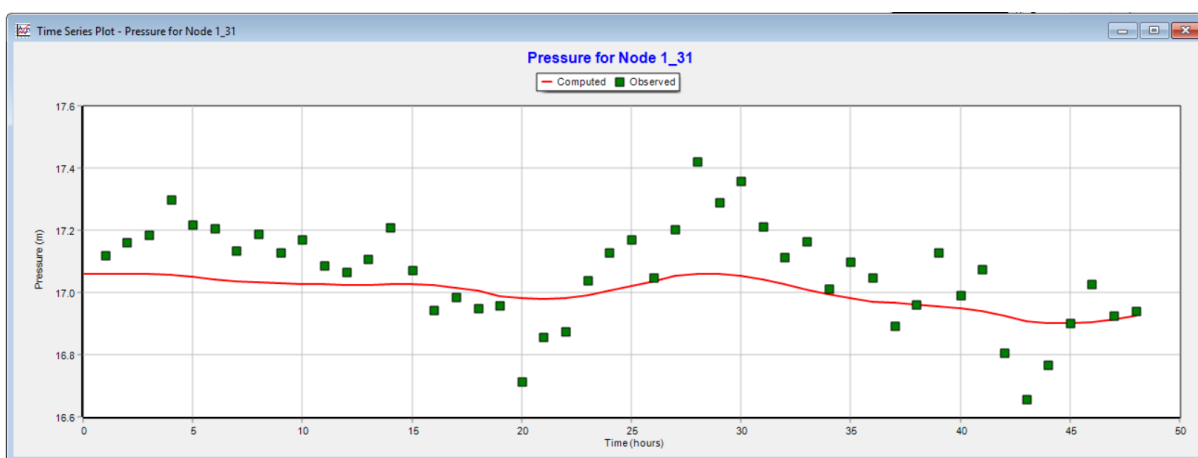
3.4.4 Zadání uzlových odběrů

Aby mohl být proveden výpočet v Epanetu, je potřeba zadat minimálně jeden uzlový odběr. Velikost odběrů v jednotlivých uzlech byla stanovena následovně. Od provozovatele sítě byl získán soupis všech domů připojených k vodovodní síti. Do každého domu vede jedna přípojka, na které je umístěn vodoměr, z kterého jsou pravidelně zapisovány objemy proteklé vody, neboli voda fakturovaná. Ke každému domu je tak možné přiřadit hodnotu odběru vody za rok. Pro model Velkého Beranova byly použity údaje za rok 2017. Kvůli zjednodušení se v modelu nedělají uzly pro každou přípojku, proto je potřeba zařadit každou přípojku do úseku kam je připojena. Následně sečíst odběry a poté je rovným dílem rozdělit mezi přilehlé uzly. Tímto způsobem byla rozdělena všechna fakturovaná voda.

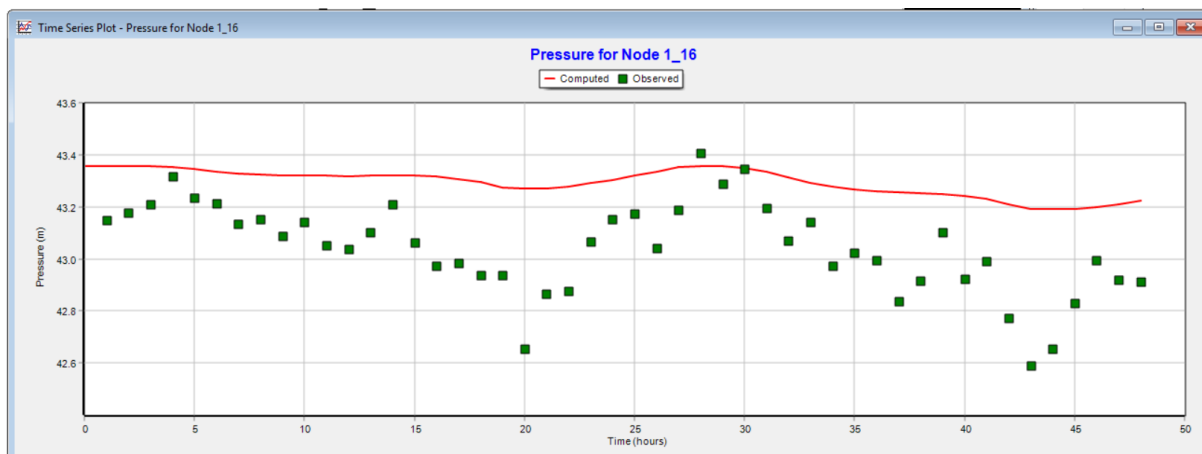
3.5 KALIBRACE A VERIFIKACE MODELU

3.5.1 Kalibrace

Nyní je již celý model sestaven, jsou zadány všechny hodnoty do uzlů, úseků i objektů na síti. Model je v tuto chvíli již funkční, ale je potřeba ověřit správnost hodnot, které udává a následně je zpřesnit. K tomuto kroku slouží kalibrace.



Obr. 3.14 Tlak v uzlu 1_31 před kalibračním zásahem



Obr. 3.15 Tlak v uzlu 1_16 před kalibračním zásahem

Pro kalibraci byla použita 2/3 dat z měrné kampaně. Grafy výše ukazují průběh tlaků na uzlu 1_31 a na uzlu 1_16. To jsou uzly, kde byla při měrné kampani osazena tlaková čidla. Oba grafy byly vytvořeny v softwaru Epanet. Červená křivka je průběh tlaků za časovou řadu, tak jak je spočítal program. Zelené čtverce značí hodnoty tlaků naměřené pomocí tlakových čidel na síti. Časová řada zahrnuje 48 hodin. Prvních 24 hodin simuluje průběh tlaků v pracovní dny a druhých 24 hodin v nepracovní.

Nyní bylo zapotřebí umístit červenou křivku tak, aby co nejvíce odpovídala hodnotám naměřeným na skutečné vodovodní síti. K tomuto kroku byla použita metoda nejmenších čtverců.

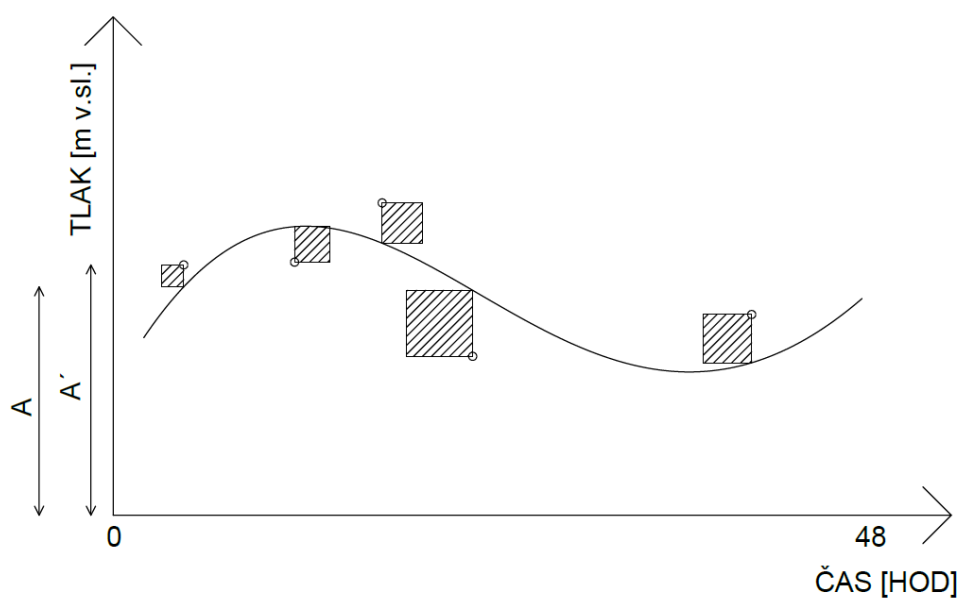
3.5.2 Metoda nejmenších čtverců

U této metody jde o nalezení polynomu, který co nejlépe vystihuje chování rozptýlených bodů. Cílem přitom je, aby součet kvadrátů odchylek y-ových souřadnic bodů od funkční hodnoty byl co nejmenší. [16]

Pro kalibraci byl tedy použit následující vztah, výpočet pomocí nejmenších čtverců.

$$\sum_{1}^{48} (A' - A)^2 - \sum_{1}^{48} (B' - B)^2 \Rightarrow MIN \quad (3.1)$$

Kde: A' ... průměrný hodinový tlak naměřený při měrné kampani na hydrantu č.4
A ... průměrný hodinový tlak spočítaný v hydraulickém modelu pro uzel 1_31
B' ... průměrný hodinový tlak naměřený při měrné kampani na hydrantu č.18
B ... průměrný hodinový tlak spočítaný v hydraulickém modelu pro uzel 1_16



Obr. 3.16 Grafické znázornění metody nejmenších čtverců

Tab. 7 Kalibrace modelu pomocí metody nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců									
č.183, node 1_31					č.205, node 1_16				
	čas [hod]	A	A'	(A'-(A+rozdl)) ²	A+rozdl	B	B'	(B'-(B+rozdl)) ²	B+rozdl
pracovní dny	1	16,7327	17,1181	0,0253163	16,959	43,0316	43,1481	0,012044959	43,2579
	2	16,7327	17,1601	0,040461033	16,959	43,0317	43,1760	0,006730545	43,2580
	3	16,7326	17,1849	0,051061968	16,9589	43,0315	43,2094	0,00233972	43,2578
	4	16,7296	17,2989	0,117670943	16,9559	43,0277	43,3161	0,003852698	43,2540
	5	16,7246	17,2178	0,071233829	16,9509	43,021	43,2336	0,000187776	43,247
	6	16,7153	17,2053	0,069565054	16,9416	43,0081	43,2120	0,000500378	43,2344
	7	16,7099	17,1341	0,039161119	16,9362	43,0018	43,1335	0,008941683	43,2281
	8	16,7062	17,1875	0,065020768	16,9325	42,9985	43,1530	0,005151748	43,2248
	9	16,7027	17,1296	0,040244474	16,929	42,9952	43,0883	0,01773242	43,2215
	10	16,7025	17,1696	0,057992664	16,9288	42,9963	43,1413	0,006610467	43,2226
	11	16,701	17,0853	0,024960664	16,9273	42,9946	43,0523	0,028438802	43,2209
	12	16,6992	17,0643	0,019255719	16,9255	42,9926	43,0375	0,032903577	43,2189
	13	16,6999	17,1089	0,033374837	16,9262	42,9944	43,1006	0,014416581	43,2207
	14	16,7016	17,2086	0,078796693	16,9279	42,9965	43,2090	0,000191428	43,2228
	15	16,7011	17,0724	0,021023387	16,9274	42,9953	43,0642	0,024762329	43,2216
	16	16,6985	16,9440	0,000367855	16,9248	42,9917	42,9714	0,060786152	43,2180
	17	16,6915	16,9853	0,00455024	16,9178	42,9826	42,9844	0,050405188	43,2089
	18	16,6806	16,9506	0,001913137	16,9069	42,9697	42,9364	0,06736894	43,1960
	19	16,6629	16,9573	0,004640986	16,8892	42,948	42,9390	0,055357323	43,1743
	20	16,6573	16,7139	0,028809724	16,8836	42,9465	42,6538	0,269370371	43,1728
	21	16,6539	16,8566	0,000555229	16,8802	42,9455	42,8648	0,094238479	43,1718
	22	16,6585	16,8745	0,000105368	16,8848	42,954	42,8776	0,091610828	43,1803
	23	16,6685	17,0391	0,020830878	16,8948	42,9666	43,0663	0,016020168	43,1929
	24	16,6819	17,1298	0,049092319	16,9082	42,9804	43,1531	0,002869918	43,2067
nepracovní dny	25	16,6967	17,1716	0,061778822	16,923	42,9955	43,1732	0,002365124	43,2218
	26	16,7126	17,0466	0,011598414	16,9389	43,0116	43,0413	0,03864008	43,2379
	27	16,7294	17,2026	0,060939482	16,9557	43,0284	43,1888	0,004340306	43,2547
	28	16,7327	17,4206	0,213052925	16,959	43,0317	43,4076	0,022386772	43,2580
	29	16,7319	17,2891	0,10946626	16,9582	43,0306	43,2866	0,000882959	43,2569
	30	16,7267	17,3579	0,163932214	16,953	43,0238	43,3471	0,009416683	43,2501
	31	16,7157	17,2127	0,073272646	16,942	43,0086	43,1961	0,001501895	43,2349
	32	16,7006	17,1143	0,03511041	16,9269	42,9882	43,0698	0,020923546	43,2145
	33	16,6816	17,1643	0,065736069	16,9079	42,9655	43,1425	0,002430345	43,1918
	34	16,6672	17,0120	0,014042518	16,8935	42,9518	42,9745	0,041454229	43,1781
	35	16,6555	17,0997	0,047465933	16,8818	42,9418	43,0241	0,020746469	43,1681
	36	16,6454	17,0476	0,030953665	16,8717	42,933	42,9959	0,026698379	43,1593
	37	16,6405	16,8930	0,0006848	16,8668	42,9309	42,8387	0,101409736	43,1572
	38	16,6356	16,9602	0,009672126	16,8619	42,927	42,9141	0,057196642	43,1533
	39	16,6314	17,1274	0,072750669	16,8577	42,9234	43,1024	0,002234683	43,1497
	40	16,6255	16,9919	0,019637068	16,8518	42,9168	42,9227	0,04857605	43,1431
	41	16,6156	17,0742	0,05397493	16,8419	42,9052	42,9926	0,019301703	43,1315
	42	16,5995	16,8063	0,000380205	16,8258	42,8856	42,7720	0,115515072	43,1119
	43	16,583	16,6556	0,023635334	16,8093	42,8675	42,5888	0,254988647	43,0938
	44	16,5769	16,7669	0,001314112	16,8032	42,8656	42,6556	0,190390742	43,0919
	45	16,576	16,9027	0,010074923	16,8023	42,8686	42,8302	0,070081249	43,0949
	46	16,5794	17,0258	0,048446243	16,8057	42,8746	42,9952	0,011171899	43,1009
	47	16,5888	16,9265	0,012415058	16,8151	42,8866	42,9203	0,037086393	43,1129
	48	16,6029	16,9390	0,012058266	16,8292	42,9017	42,9139	0,045826206	43,1280
				Σ	2,018398286				

3.5.3 Výsledky kalibrace

Pomocí funkce řešitel bylo nalezeno řešení, kdy si jsou rovny sumy čtverců v obou uzlech, kde probíhala kalibrace. Na základě tohoto výsledku bylo umístěno dno vodojemu Velký Beranov Nový na novou kótu. Původní nadmořská výška dna vodojemu činila 558,94 m n.m. Nově byla tato hodnota snížena o 10 cm na výšku 558.84 m n.m. Současně s tím došlo ke snížení polohy hladiny, která ovlivňuje tlakové poměry v modelované síti.

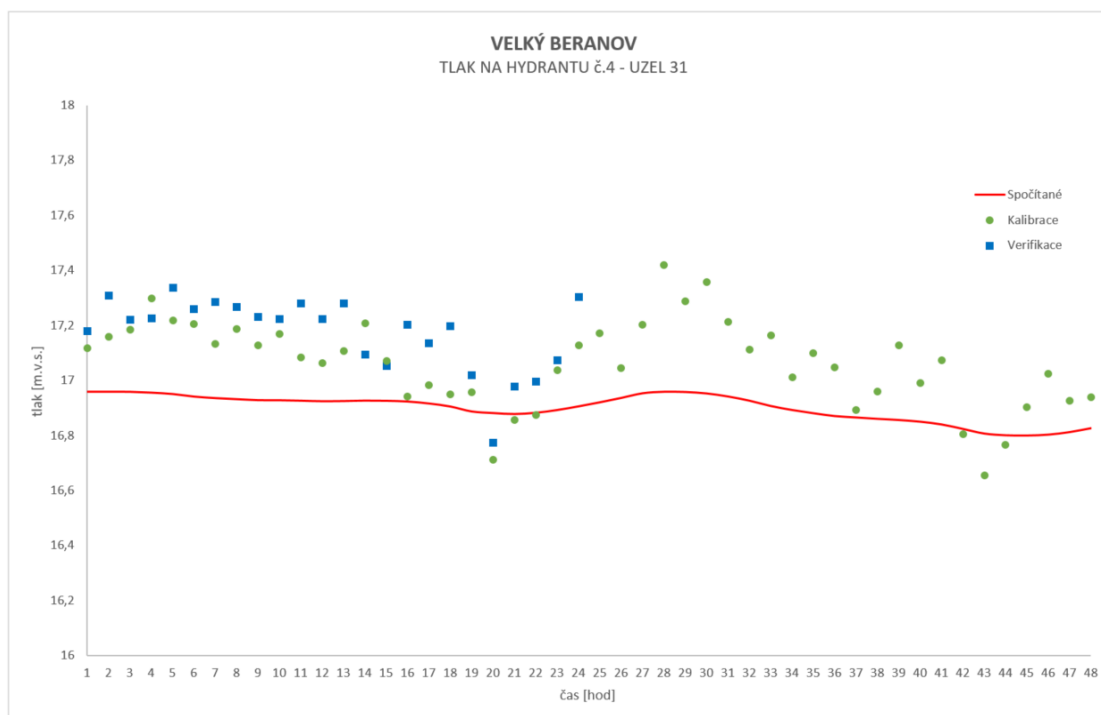
3.5.4 Verifikace

Pro verifikaci modelu byla použita zbylá 1/3 dat naměřených při měrné kampani. Pomocí těchto dat došlo k ověření kalibračního zásahu a výsledné přesnosti modelu. Do modelu již nebylo žádným způsobem zasaženo.

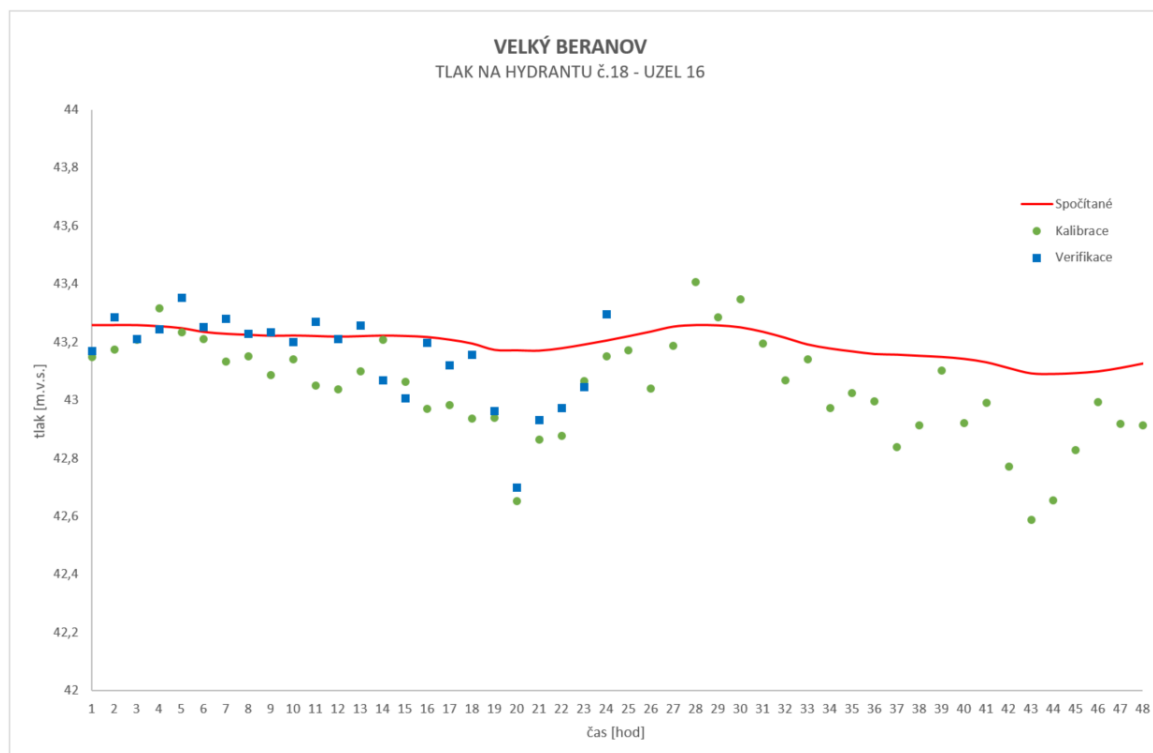
Tab. 8 Průměrný rozdíl mezi kalibrací a daty pro verifikaci

	kalibrace [m v.sl.]	verifikace [m v.sl.]	rozdíl [m v.sl.]
uzel 1_31	17,06	17,11	0,05
uzel 1_16	43,04	43,08	0,04

Graf 5 Průběh tlaků v uzlu 1_31 po kalibraci



Graf 6 Průběh tlaků v uzlu 1_16 po kalibraci

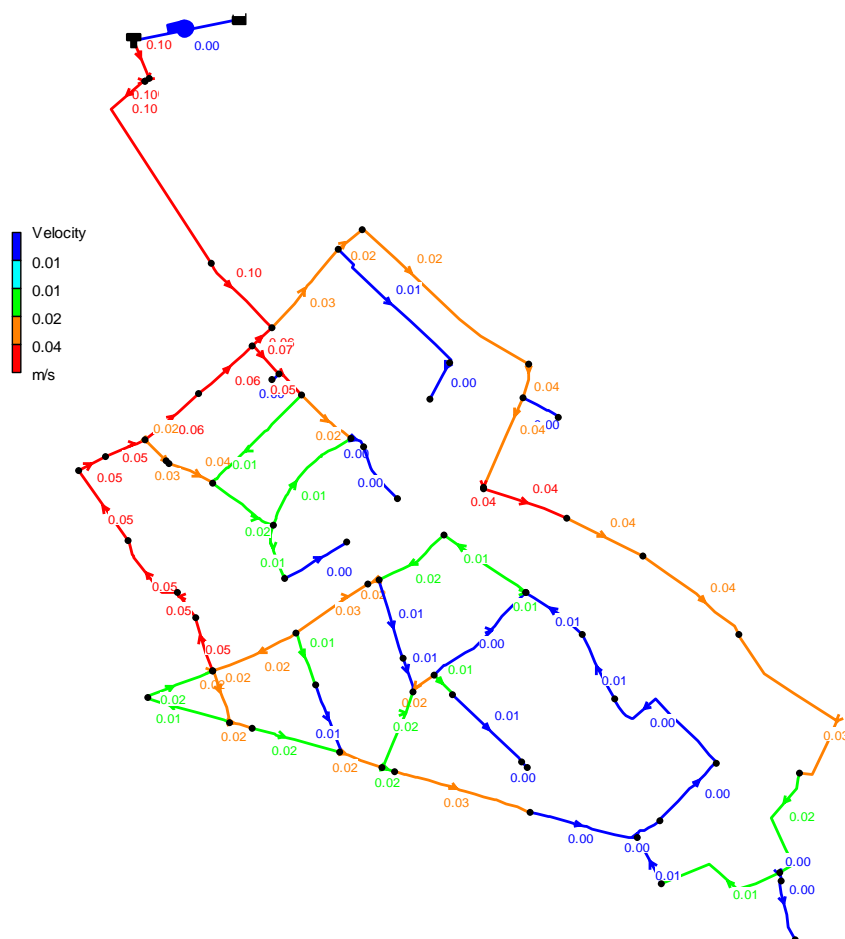


Grafy výše ukazují výsledné rozdíly mezi tlaky naměřenými na vodovodní síti při měrné kampani a tlaky, které udává hydraulický model. Na uzlu 1_31 činí průměrná odchylka 0,18 m v.sl. Maximální odchylka je 0,46 m v.sl. U druhého měřeného uzlu 1_16 je průměrná odchylka 0,17 m v.sl. Maximální odchylka je zde 0,52 m v.sl. Odchytky této velikosti lze považovat za nízké. Přesnost hydraulického modelu je tak pro daný účel dostatečná.

3.6 POSOUZENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ

Rychlost proudění vody patří mezi důležité hydraulické veličiny ve vodovodní síti. Výpočet rychlostí je součástí výstupů hydraulického modelu. Ve Velkém Beranově jsou rychlosti proudění vody v síti velmi nízké. Je to způsobeno několika faktory. Největší vliv na velikost rychlostí má dimenze potrubí a odběr vody. Malé rychlosti, jaké jsou právě ve Velkém Beranově, jsou tedy způsobeny předdimenzováním sítě v kombinaci s malými odběry vody. V době výstavby vodovodní sítě ve Velkém Beranově se předpokládalo, že spotřeba vody v domácnostech poroste. Potrubí se proto navrhovalo ve větších průměrech. Naproti tomu spotřeba vody v posledních letech klesala. To má za následek právě malé rychlosti proudění vody ve vodovodní síti Velkého Beranova. Z důvodu malých průtoků se pak voda v potrubí zdržuje delší dobu a může dojít ke zhoršení její jakosti. Potrubí s nízkými rychlostmi je také náchylnější na ukládání sedimentu na stěnách potrubí a při náhlém zvýšení rychlostí může dojít k jeho uvolnění a vzniku zákalové události. Protože k dlouhodobému

zvýšení rychlostí ve Velkém Beranově pravděpodobně v nejbližší době nedojde, je zapotřebí vodovodní síť pravidelně odkalovat, nebo použít účinnější metodu – řízený proplach celé vodovodní sítě. Tímto způsobem se dá předcházet tomu, aby se zákal dostával ke spotřebitelům. Maximální přípustný limit pro zákal v pitné vodě je 5 ZF_n.



Obr. 3.17 Nejvyšší dosažené rychlosti ve vodovodní síti

Obrázek výše znázorňuje nejvyšší rychlosti, jaké se ve vodovodní síti ve Velkém Beranově vyskytují. Obrázek byl vytvořen v programu Epanet 2.0.

Nejvyšších rychlostí je dosahováno v době největších odběrů, tedy při ranní a večerní špičce. Největší rychlosti jsou v zásobním řadu, zde rychlosti dosahují hodnot $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ve spotřebišti jsou rychlosti menší. V některých úsecích, zejména koncových, je rychlost proudění vody téměř nulová.

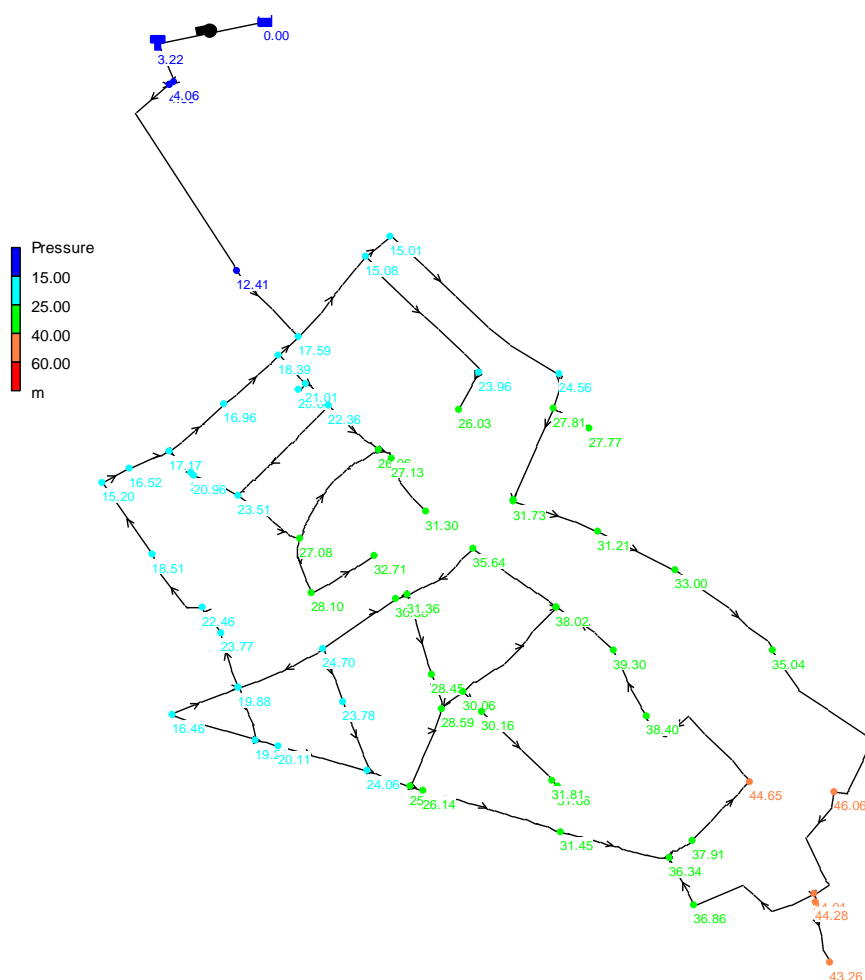
3.7 POSOUZENÍ STÁVAJÍCÍCH TLAKOVÝCH POMĚRŮ

Posouzení tlakových poměrů bylo provedeno dle vyhlášky 428/2001 Sb. Vyhláška byla vydána ministerstvem zemědělství a provádí zákon č. 274/2001 Sb. o vodovodech

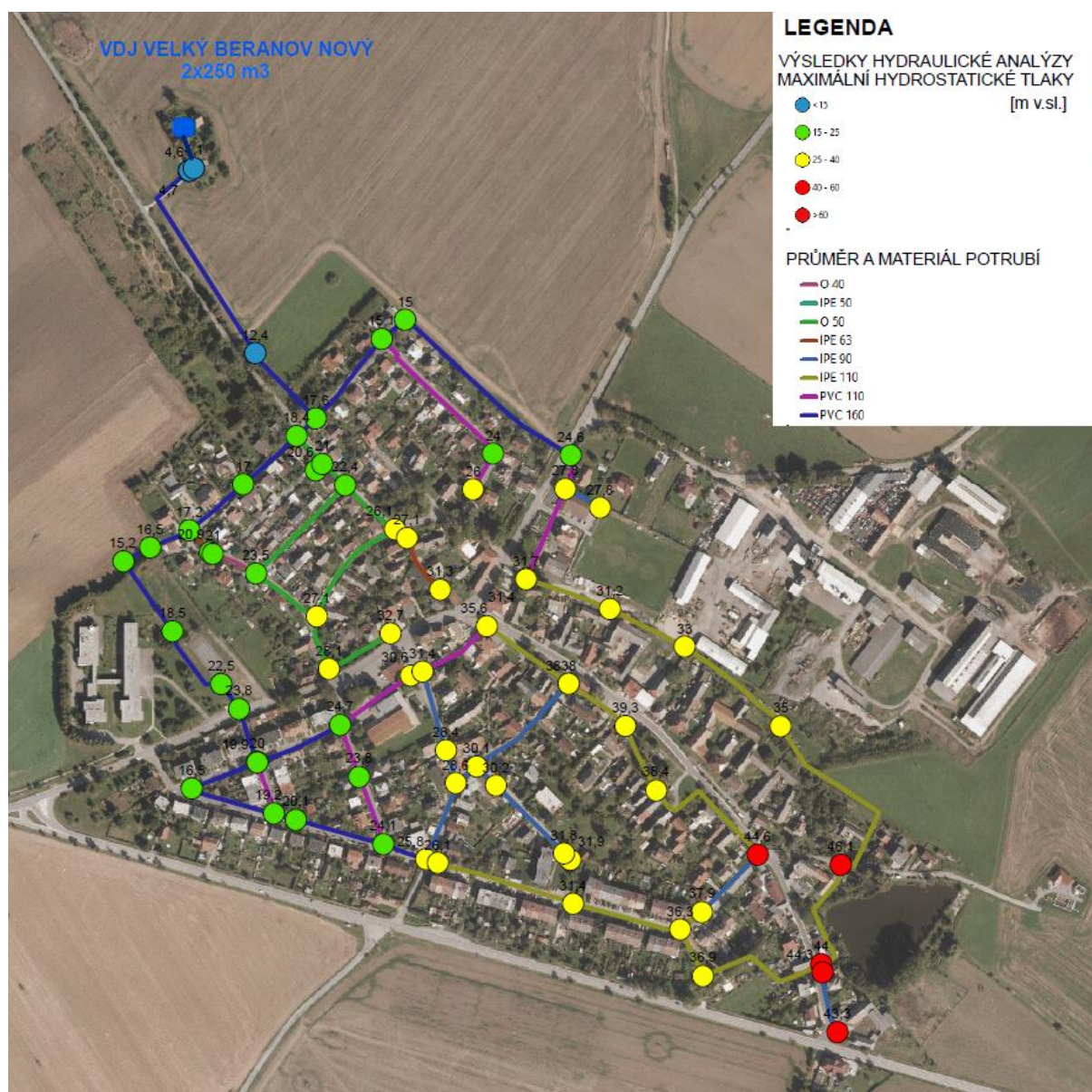
a kanalizacích pro veřejnou potřebu. Podle této vyhlášky maximální přetlak na vodovodní síti nesmí překročit hodnotu 0,6 MPa, v odůvodněných případech 0,7 MPa. Dále je stanoven minimální tlak na vodovodní přípojce. Ten je stanoven na 0,15 MPa pro budovy do dvou nadzemních podlaží. Pro budovy vyšší než dvě nadzemní podlaží, je tato hodnota zvýšena na 0,25 MPa.

3.7.1 Maximální hydrostatický tlak

Maximální tlaky se ve spotřebišti Velký Beranov nachází na jihozápadě a to z důvodu, že je zde nejmenší nadmořská výška. Maximální tlak je zde 0,46 MPa, to s velkou rezervou vyhovuje vyhlášce, která udává nejvyšší povolený přetlak na síti 0,6 MPa. V žádném místě vodovodní sítě tedy nedochází k překročení maximálního povoleného tlaku. Hodnoty maximálních tlaků v celé síti splňují podmínky vyhlášky č.428/2001 Sb.



Obr. 3.18 Maximální tlaky ve vodovodní síti – výstup z hydraulického simulačního modelu vodovodní sítě



Obr. 3.19 Maximální tlaky na vodovodní síti a průměry vodovodního potrubí

Situace výše ukazuje maximální hydrostatické tlaky ve vodovodní síti Velkého Beranova. Barva úseků prozrazuje materiál a dimenzi potrubí. Hydraulický model je podložen ortofoto mapou obce.

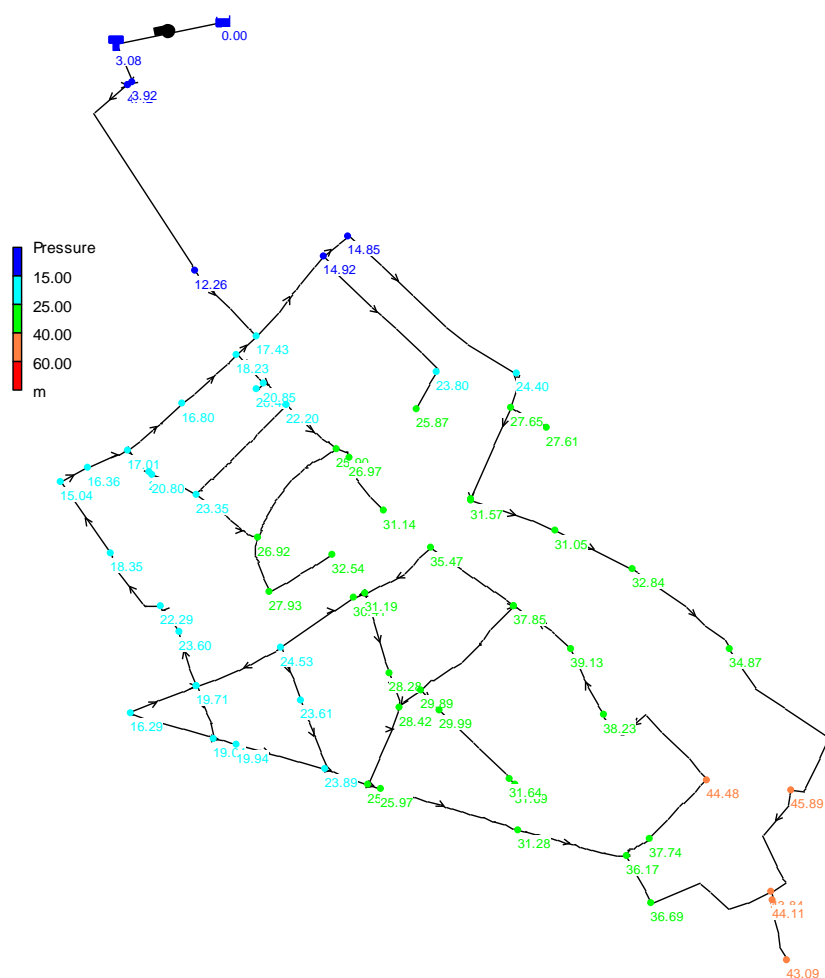
Největších tlaků je dosahováno v době nejnižších odběrů. Malé odběry znamenají malý průtok a malou rychlost proudění vody v potrubí. Díky tomu jsou menší tlakové ztráty a tlak v jednotlivých uzlech je tak větší. Dalším faktorem, na kterém je velikost tlaků přímo závislá, je výška hladiny ve vodojemu. Přes noc se do vodojemu dočerpá deficit vody z předchozího dne a nad ráno tak bývá výška hladiny ve vodojemu na horní provozní hladině. V této době tak na vodovodní síti naměříme nejvyšší tlaky.

Podrobněji si lze prohlédnout situaci maximálních hydrostatických tlaků v příloze 1.

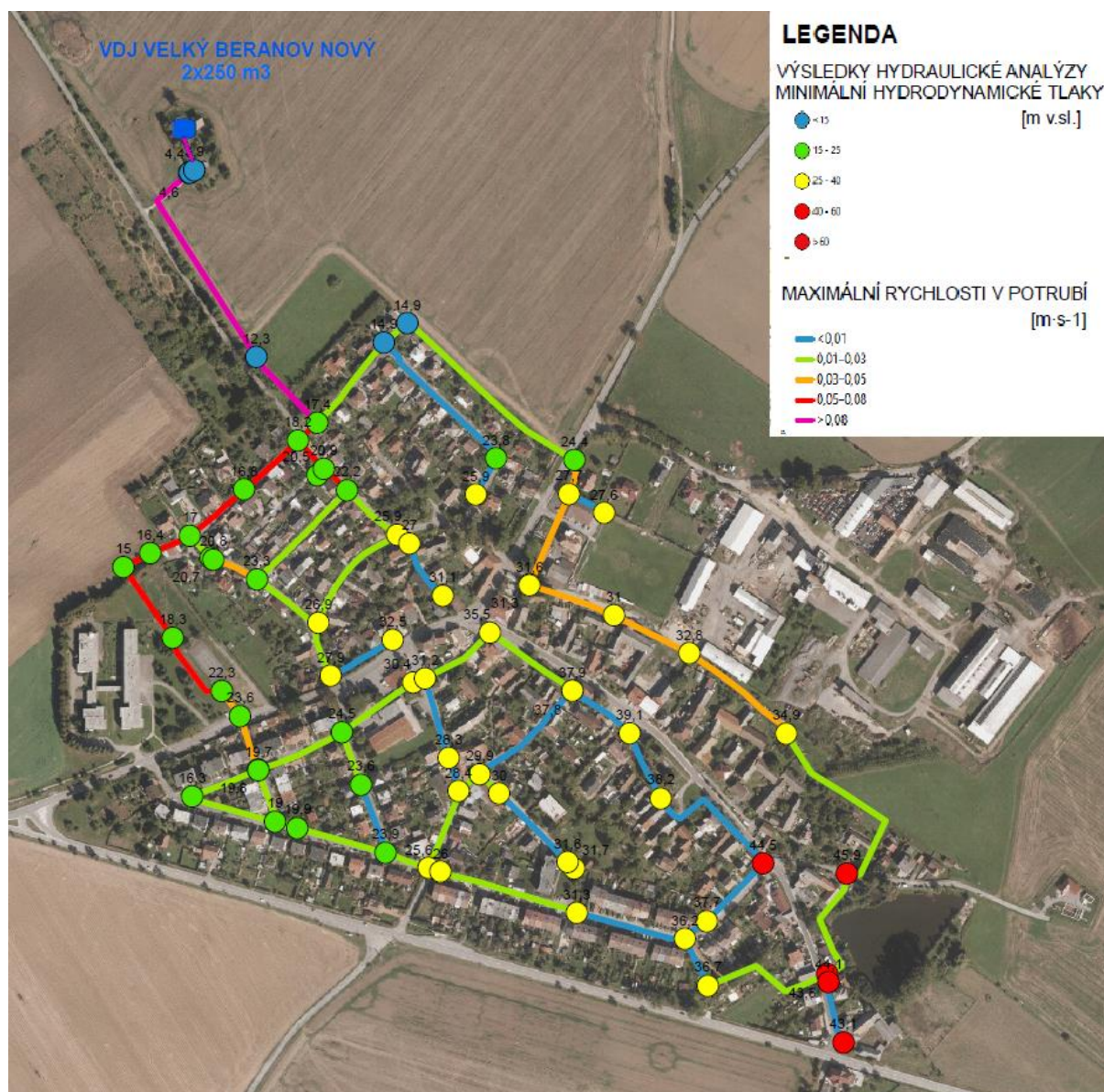
3.7.2 Minimální hydrodynamický tlak

Minimální tlaky hned ve dvou uzlech ve spotřebišti nevyhoví. Jde o uzly, které se nacházejí nejbližší vodojemu a mají nejvyšší nadmořskou výšku. Nejnižší hodnota tlaku je 0,1485 MPa. V této části spotřebišť se nachází několik rodinných domů do dvou nadzemních podlaží. Dle vyhlášky by zde měl být minimální tlak alespoň 0,15 MPa. Tato část spotřebišť tedy vyhlášce nevyhovuje.

V obci se nachází jeden bytový dům, který má 3 nadzemní podlaží. Proto by zde měl být minimální tlak alespoň 0,25 MPa. Tlak v této části obce se pohybuje kolem 0,31 MPa. Přetlak u bytového domu je tak podle vyhlášky dostačující. Podrobněji si lze prohlédnout situaci minimálních hydrodynamických tlaků v příloze 2. [17]



Obr. 3.20 Minimální tlaky na vodovodní síti - výstup z hydraulického simulačního modelu vodovodní sítě



Obr. 3.21 Minimální tlaky ve vodovodní síti a rychlosti proudění v potrubí

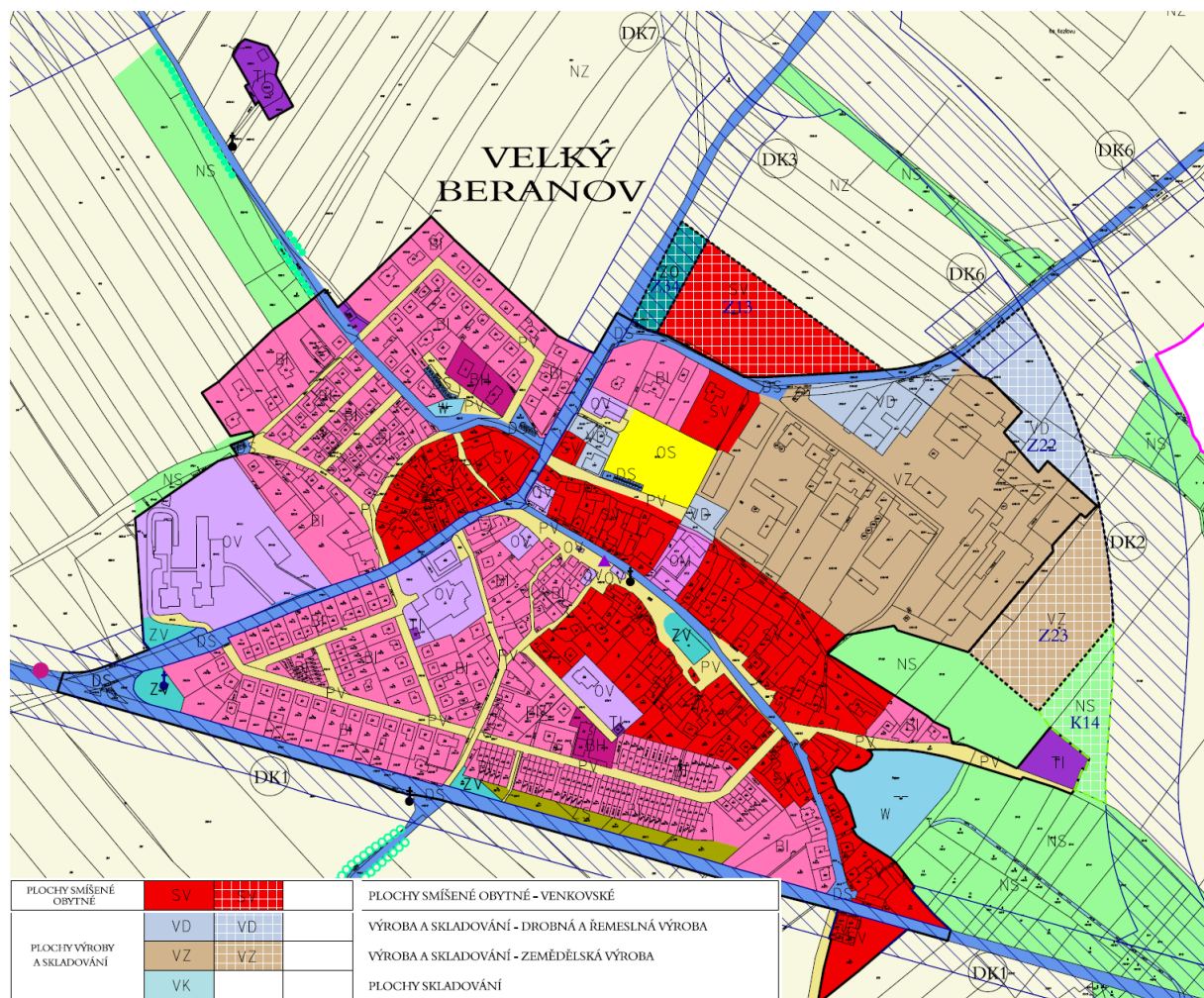
Situace výše ukazuje minimální hydrodynamické tlaky ve vodovodní síti Velkého Beranova. Barva úseků ukazuje rychlosti proudění vody v jednotlivých úsecích. Hydraulický model je podložen ortofoto mapou Velkého Beranova.

Oproti maximálním tlakům se ty minimální objevují v době největších odběrů. Při zvýšení odběrů vody z vodovodní sítě dochází k prázdnění vodojemu a snížení jeho hladiny, tím se také snižuje tlak ve vodovodní síti. Kvůli zvýšeným rychlostem dochází také k nárůstu tlakové ztráty, díky většímu tření vody o stěny potrubí.

3.8 POSOUZENÍ TLAKOVÝCH POMĚRŮ S OHLEDEM NA VÝHLEDOVÝ STAV ZÁSTAVBY

Výhledovým stavem se rozumí oblasti, kam se bude obec v nejbližších letech rozvíjet. Tyto rozvojové oblasti se zjišťují z územního plánu obce. Územní plán je veřejný dokument, který schvaluje zastupitelstvo dané obce.

Ve Velkém Beranově se počítá s výstavbou rodinných domů venkovského charakteru v severní části obce. V této části obce se terén zvedá, to znamená, že tlaky zde budou nižší než v současné vodovodní síti, na které již nyní některé úseky mají nevyhovující tlak.

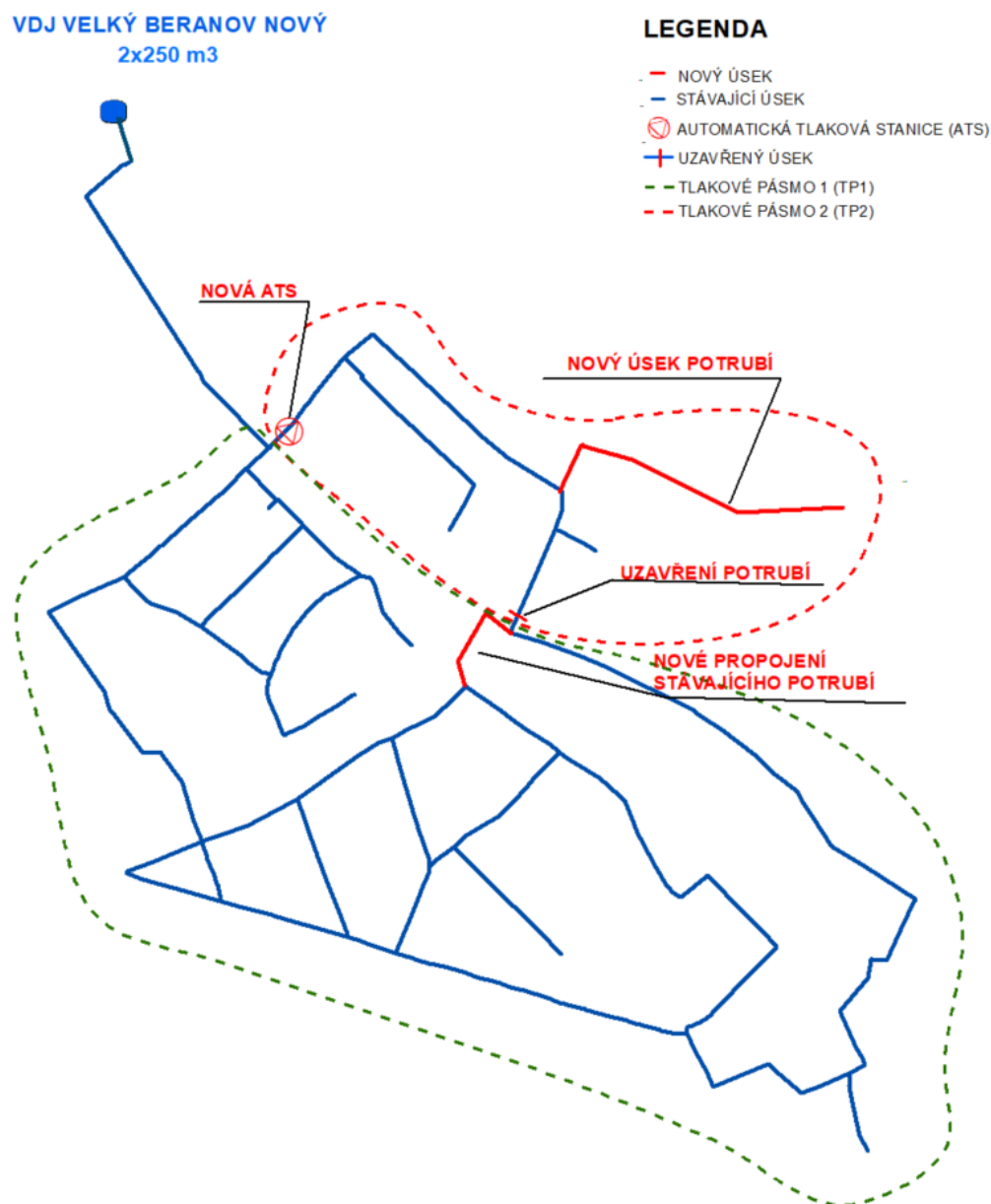


Obr. 3.22 Územní plán Velkého Beranova

3.8.1 Návrh opatření pro optimalizaci tlakových poměrů ve vodovodní síti

S ohledem na stávající i výhledový stav jsem navrhl opatření. Maximální tlaky v současné době ani výhledově nepřekračují maximální stanovenou hranici. Není tak potřeba navrhovat žádná opatření na regulaci tlaku.

Naproti tomu je potřeba zvýšit tlak v horní části obce. Navrhují proto rozdělit Velký Beranov na 2 tlaková pásma. Ve spodním tlakovém pásmu TP1, by i nadále určoval přetlak vodojem Velký Beranov Nový. V novém tlakovém pásmu TP2, by byl tlak uměle zvyšován novou automatickou tlakovou stanicí ATS. Díky ní se zvýší tlak v úsecích, které současně nevyhovují vyhlášce a zároveň by byl zajištěn i dostatečný tlak v nově budovaných rodinných domech v severní části obce.



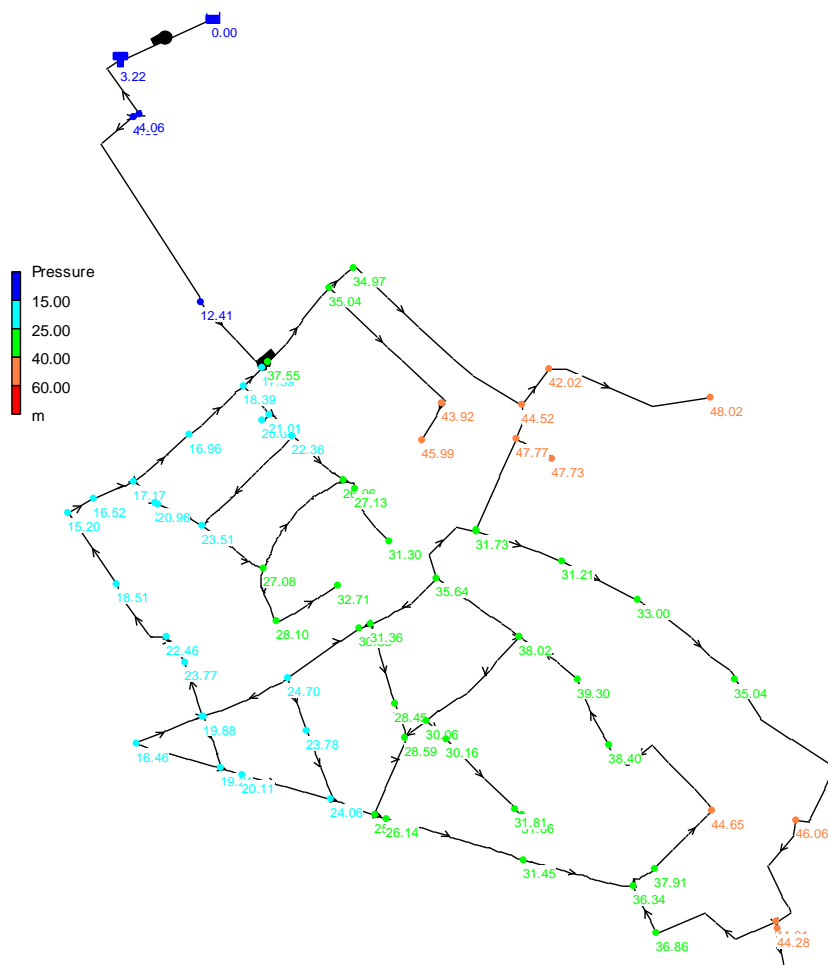
Obr. 3.23 Návrh opatření pro zvýšení tlaku ve vodovodní síti

Aby byla zachována okruhovitost vodovodní sítě, bude také potřeba vybudovat nový úsek vodovodního potrubí. Tento úsek se nachází zhruba ve středu obce a jeho délka je 65 m. S ohledem na potrubí, kam bude nový úsek zaústěn, kterými jsou PVC 110 a IPE 110, navrhuji průměr potrubí DN110. Důvodem volby tohoto materiálu je, aby byla zachována

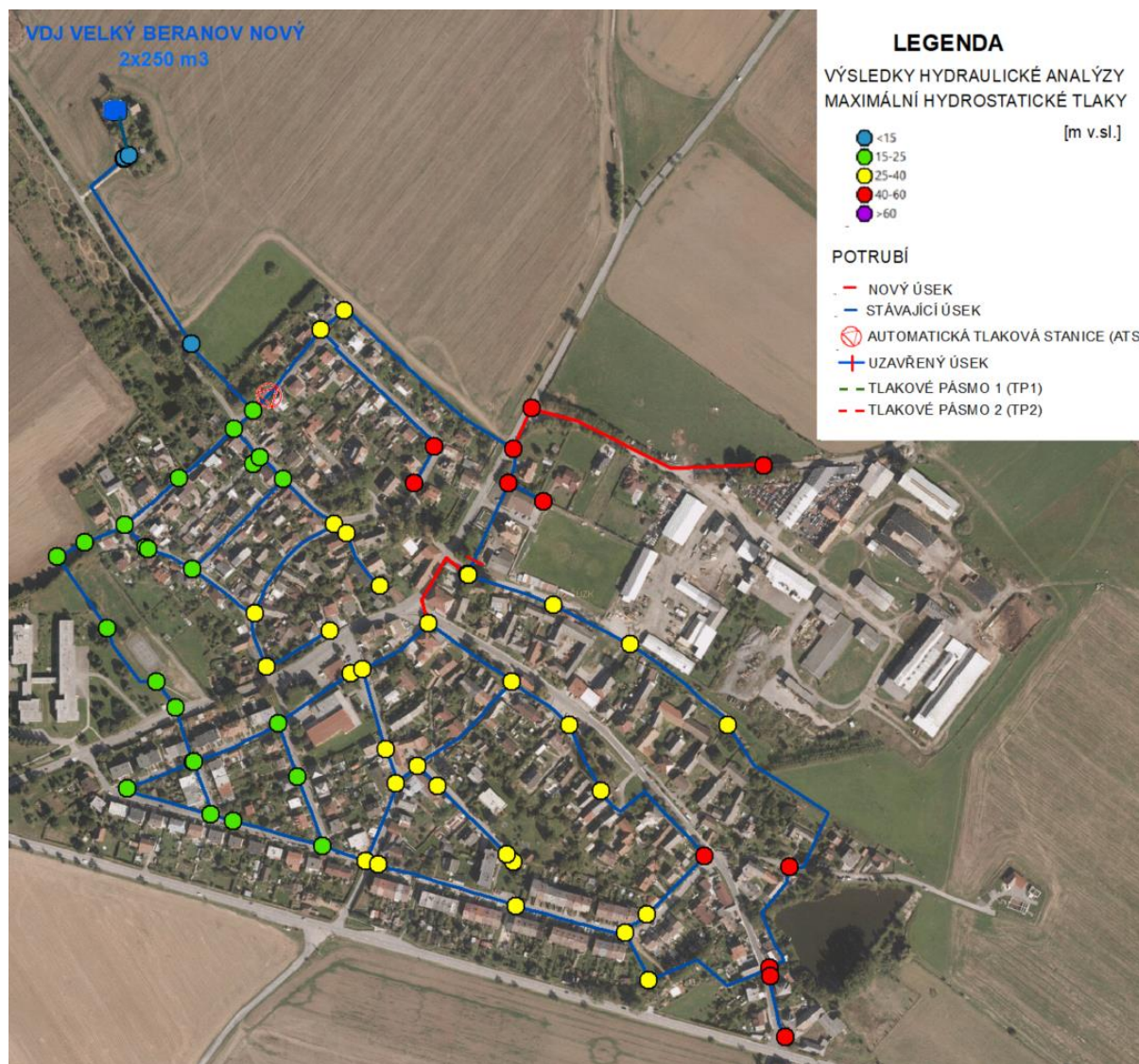
určitá homogenita nového potrubí se stávajícím. Délka nových úseků vodovodní sítě pro výhledovou zástavbu v severní části obce je 334 m.

3.8.2 Maximální hydrostatický tlak

Posouzení tlakových poměrů s ohledem na výhledovou zástavbu bylo opět provedeno podle vyhlášky 428/2001 Sb.



Obr. 3.24 Maximální tlaky na vodovodní síti - výhledový stav

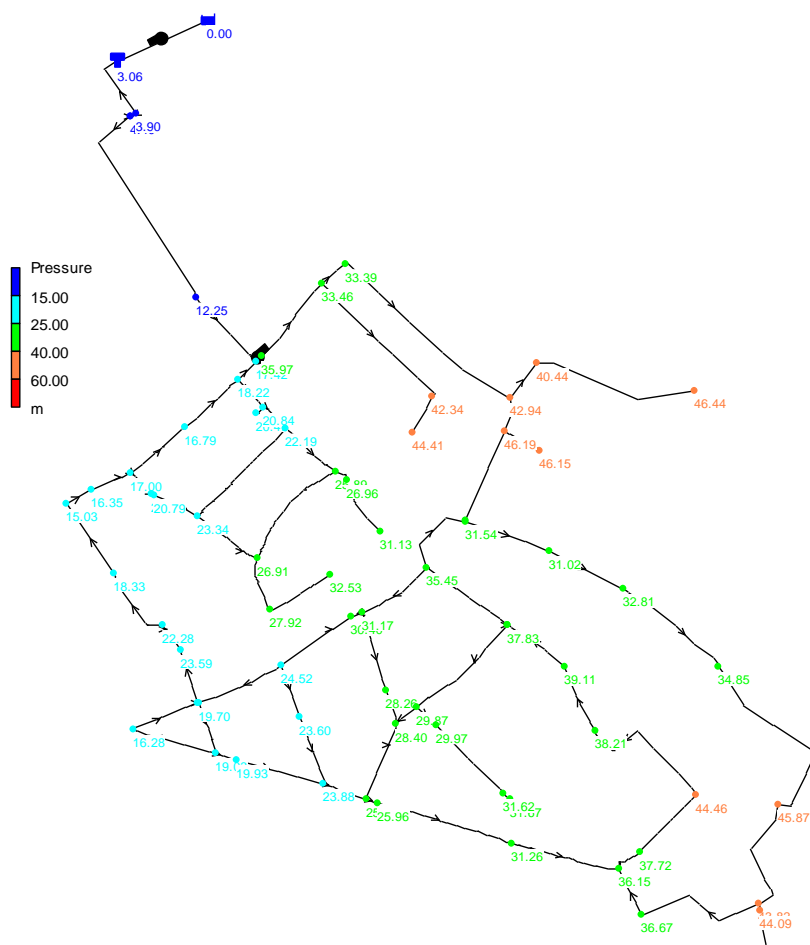


Obr. 3.25 Maximální tlaky ve vodovodní síti po zavedení opatření na optimalizaci tlakových poměrů

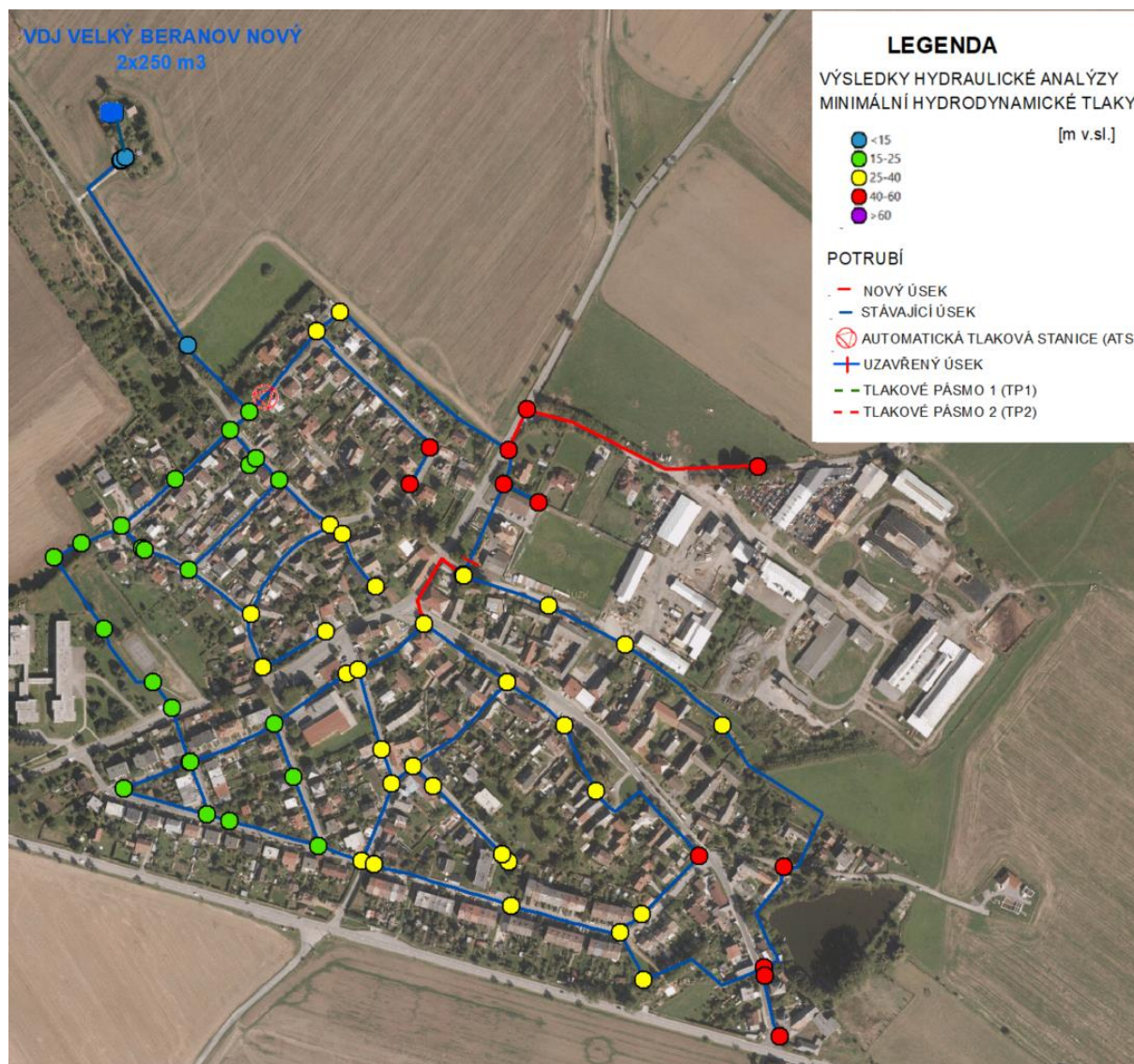
Z důvodu umístění nové automatické tlakové stanice na vodovodní síti, došlo ke zvýšení tlaků v druhém tlakovém pásmu (TP2). Maximální tlaky se zde nově pohybují od 0,33 MPa do 0,46 MPa. Maximální tlaky ve zbytku obce, tedy v tlakovém pásmu 1 (TP1), se téměř nezmění. Maximální hydrostatický tlak nikde ve vodovodní síti obce Velký Beranov nepřekročí limitní hodnotu 0,6 MPa, viz příloha 3.

3.8.3 Minimální hydrodynamický tlak

Po zavedení opatření na optimalizaci tlakových poměrů na vodovodní síti v obci Velký Beranov, které zahrnovali i výstavbu nové automatické tlakové stanice, došlo ke zvýšení tlaků v úsecích, kde to bylo nezbytně nutné. Nově je v úsecích, kde byl tlak nevyhovující, minimální přetlak 0,33 MPa. Potřebný tlak je také zajištěn na území, kde by dle územního plánu obce mělo dojít k výstavbě nových rodinných domů. Zde je nyní minimální tlak 0,46 MPa.



Obr. 3.26 Minimální tlaky na vodovodní síti - výhledový stav



Obr. 3.27 Minimální tlaky ve vodovodní síti po zavedení opatření na optimalizaci tlakových poměrů

Po zavedení nové automatické tlakové stanice (ATS), se již nikde ve spotřebišti nenachází úseky, kde by nebyl dodržen minimální tlak daný vyhláškou č.428/2001 Sb. V každém místě vodovodní sítě, odkud dochází k odběrům vody, je zajištěn minimální hydrodynamický tlak 0,15 MPa, viz příloha 4.

4 ZÁVĚR

V úvodu této práce je uveden základní vztah pro výpočty v tlakových trubních systémech. Jsou zde také uvedeny zjednodušující předpoklady a důvod, proč jsou v modelování vodovodních sítí zaváděny. Dále je zde věnována pozornost rozdílům mezi modely řízenými odběrem a modely řízenými tlakem, je vysvětleno jejich použití a ke každému jsou uvedeny příklady programů, které s nimi pracují.

Druhá část práce je věnována obci Velký Beranov, u které byl vytvořen podrobný kvazidynamický hydraulický model její vodovodní sítě. Nejprve je představena samotná obec a její poloha. Poté jsou postupně popsány všechny objekty, které se nacházejí na vodovodu v obci. Mezi tyto objekty patří zdroj vody, úprava vody a vodojem Velký Beranov Nový.

V práci je popsán také postup tvorby modelu a data, která byla pro jeho vytvoření potřeba. V rámci kalibrace hydraulického modelu byla provedena měrná kampaň ve spotřebišti. Z dat, která byla při měrné kampani získána, byla provedena již zmíněná kalibrace, pro tento krok byla použita metoda nejmenších čtverců. Následně byl hydraulický model verifikován.

Na základě vytvořeného hydraulického modelu byly posouzeny tlakové poměry na stávající vodovodní síti. Posuzovány byly minimální a maximální tlaky, pozornost byla věnována i nejvyšším rychlostem, které se ve vodovodním potrubí vyskytují. Posouzení bylo provedeno dle vyhlášky 428/2001 Sb. Bylo zjištěno, že některé části vodovodní sítě nesplňují minimální tlaky dané vyhláškou a mají tlak menší než 0,15 MPa. Zároveň ale v žádné části spotřebiště není překročen maximální přípustný tlak, tedy 0,6 MPa.

Z důvodu přítomnosti nízkých tlaků, které byly na vodovodní síti zjištěny, a s ohledem na výhledovou zástavbu danou územním plánem obce Velký Beranov, bylo navrženo opatření na zvýšení tlaku. Tímto opatřením je vybudování automatické tlakové stanice, která bude zvyšovat tlak v těch částech vodovodní sítě, kde je tlak nevyhovující. Následně bylo provedeno posouzení tlaků vodovodní sítě včetně navrhovaných opatření. Při tomto posouzení se již na vodovodní síti nenacházely úseky, které by nesplňovaly hodnoty tlaků dané vyhláškou.

Podařilo se dosáhnout všech vytyčených cílů. Takto sestavený a fungující hydraulický model může sloužit při provozování stávající vodovodní sítě. V případě dalšího růstu obce, lze model dále rozšiřovat. Model může také sloužit pro sestavení proplachovacího plánu vodovodní sítě.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŘÍHA, Jaromír. *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno: PC-DIR, spol. s r.o., 1997.
- [2] TUHOVČÁK, Ladislav. *Vodárenství: Doprava vody*. Brno, 2006.
- [3] JANDORA, Jan a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Druhé. Akademické vydavatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [4] PÁEZ, D. a J. SALDARRIAGA. *Optimal design of water distribution systems with pressure driven demands* [online]. 2014, , 9 [cit. 2019-05-19].
- [5] MURANHO, J. *Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension - WaterNetGen* [online]. 2014, s. 8 [cit. 2019-05-19].
- [6] TANYIMBOH, Tiku T a Andrew TEMPLEMAN. *Pressure-Driven Modelling of Water Distribution Systems* [online]. 2002, , 9 [cit. 2019-05-20].
- [7] DO GUEN YOO. *Optimal Placement of Pressure Gauges for Water Distribution Networks Using Entropy Theory Based on Pressure Dependent Hydraulic Simulation* [online]. 2018, 24 [cit. 2019-05-19].
- [8] Todini, E.; Pilati, S. *A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Network. Computer Applications in Water Supply, Volume 1—System Analysis and Simulation*; Coulbeck, B., Chu-Hou, O., Eds.; Wiley: London, UK, 1988; pp. 1–20.
- [9] *Mike Urban* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban>
- [10] *Using Pressure Dependent Demands* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: https://communities.bentley.com/products/hydraulics___hydrology/w/hydraulics_and_hydrology__wiki/2671/using-pressure-dependent-demands
- [11] *Oficiální web obce Velký Beranov* [online]. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://www.velkyberanov.cz/index.asp>
- [12] *Počet obyvatel v obcích k 1.1.2018* [online]. [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-see2a5tx8j>
- [13] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu. In: 183/2006.
- [14] *Program rozvoje obce Velký Beranov na období 2017-2021* [online]. 2016 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://www.velkyberanov.cz/assets/File.ashx?id_org=17949&id_dokumenty=25906
- [15] *SEBA log P-3 pressure logger* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.kmtservices.nl/wp-content/uploads/2016/11/Sebalog-p3-PDF.pdf>

- [16] *Mendelu* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <http://user.mendelu.cz/marik/mat-web/mat-webse24.html>
- [17] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 428/2001 Sb, In: 428/2001.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Příklady normálních a mimořádných stavů na vodovodní síti [7]	13
Tab. 2 Použití modelů řízených odběrem (DDA) a modelů řízených tlakem (PDA)	14
Tab. 3 Přehled jednotlivých materiálů a dimenzí	24
Tab. 4 Výstup z měrné kampaně pro čidlo č.183	32
Tab. 5 Výstup z měrné kampaně pro čidlo č.205	33
Tab. 6 Vnitřní průměry plastových potrubí	35
Tab. 7 Kalibrace modelu pomocí metody nejmenších čtverců	39
Tab. 8 Průměrný rozdíl mezi kalibrací a daty pro verifikaci	40

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Pracovní prostředí programu Epanet 2.0.....	15
Obr. 2.2 Pracovní prostředí WaterNetGen	17
Obr. 2.3 Závislost ztrát vody v potrubí na tlacích v krajních uzlech - výstup z WaterNetGen	18
Obr. 3.1 Poloha Velkého Beranova v ČR	19
Obr. 3.2 Katastrální území obce Velký Beranov	20
Obr. 3.3 Podzemní vrty	21
Obr. 3.4 Odradonovací věž	21
Obr. 3.5 Úpravna vody.....	21
Obr. 3.6 Vstup do VDJ Nový.....	22
Obr. 3.7 Armaturní komora ve VDJ Nový.....	22
Obr. 3.8 Schéma VDJ Starý ze systému SCADA	23
Obr. 3.9 Zakalená voda z hydrantu	29
Obr. 3.10 Propláchnutí hydrantu	29
Obr. 3.11 Situace umístění tlakových čidel na vodovodní síti – schéma sítě z hydraulického modelu.....	30
Obr. 3.12 Obě tlaková čidla umístěná v podzemních hydrantech.....	30
Obr. 3.13 Pracovní prostředí softwaru Epanet 2.0	34
Obr. 3.14 Tlak v uzlu 1_31 před kalibračním zásahem	36
Obr. 3.15 Tlak v uzlu 1_16 před kalibračním zásahem	37
Obr. 3.16 Grafické znázornění metody nejmenších čtverců	38
Obr. 3.17 Nejvyšší dosažené rychlosti ve vodovodní síti	42
Obr. 3.18 Maximální tlaky ve vodovodní síti – výstup z hydraulického simulačního modelu vodovodní sítě	43
Obr. 3.19 Maximální tlaky na vodovodní síti a průměry vodovodního potrubí	44
Obr. 3.20 Minimální tlaky na vodovodní síti - výstup z hydraulického simulačního modelu vodovodní sítě	45
Obr. 3.21 Minimální tlaky ve vodovodní síti a rychlosti proudění v potrubí	46
Obr. 3.22 Územní plán Velkého Beranova	47
Obr. 3.23 Návrh opatření pro zvýšení tlaku ve vodovodní síti	48
Obr. 3.24 Maximální tlaky na vodovodní síti - výhledový stav.....	49
Obr. 3.25 Maximální tlaky ve vodovodní síti po zavedení opatření na optimalizaci tlakových poměrů.....	50
Obr. 3.26 Minimální tlaky na vodovodní síti - výhledový stav	51

Obr. 3.27 Minimální tlaky ve vodovodní síti po zavedení opatření na optimalizaci tlakových poměrů.....	52
--	----

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Procentuální zastoupení jednotlivých materiálů a dimenzí potrubí v obci	24
Graf 2 Průběh spotřeby vody v pracovní dny	26
Graf 3 Průběh spotřeby vody v nepracovní dny.....	27
Graf 4 Průběh spotřeby vody za všechny dny.....	28
Graf 5 Průběh tlaků v uzlu 1_31 po kalibraci	40
Graf 6 Průběh tlaků v uzlu 1_16 po kalibraci	41

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

h ...výška profilu

p ...tlak [Pa]

ρ ...hustota kapaliny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

α ...Coriolisovo číslo

v ...rychlost kapaliny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

P_i^{ref} ...potřebný tlak k plnému uspokojení odběru q_i^{req}

P_i^{min} ...minimální tlak, pod menším tlakem nemůže být voda do uzlu dopravena

α ...exponent vztahu mezi tlakem a odběrem

P_i ...aktuální tlak na uzlu i

q_k^{leak} ...celková ztráta vody po délce potrubí k

l_k ...délka úseku

α_k, β_k ...koeficienty ztrát vody únikem z potrubí

C_k, δ_k ...koeficienty ztrát vody způsobených poruchou

P_k ...průměrný tlak v potrubí k , průměr z přilehlých uzlů

q^* ...vektor odběrů a ztrát pro uzly s nedostatkem tlaku

A_{22} ...diagonální matice, vztah: tlaková výška-odtok, tlak-ztráty

Q ...neznámý průtok

H ...neznámá tlaková výška

H_0 ...známá tlaková výška

A_{11} ...diagonální matice pro potrubí a čerpadla

A_{12}, A_{21} ...matice definující napojení jednotlivých úseků na uzly

A_{10} ...topologie pro uzly se známou tlakovou výškou

DDA...model řízený odběrem

DDA...model řízený tlakem

DN...průměr potrubí [mm]

O50...ocelové potrubí DN50

IPE...polyetylen

PVC...polyvinylchlorid

ATS...automatická tlaková stanice

TP1...tlakové pásmo 1

TP2... Tlakové pásmo 2

VDJ...vodojem

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výsledky hydraulické analýzy – současný stav – maximální hydrostatické tlaky
M 1:4 000
2. Výsledky hydraulické analýzy – současný stav – minimální hydrodynamické tlaky
M 1:4000
3. Výsledky hydraulické analýzy – výhledový stav – maximální hydrostatické tlaky
M 1:4 000
4. Výsledky hydraulické analýzy – výhledový stav – minimální hydrodynamické tlaky
M 1:4 000
5. Situace širších vztahů M 1:20 000

SUMMARY

For the municipality of velký Beranov was created a detailed quasi-dynamic hydraulic model of its water supply network. For the municipality of velký Beranov was created a detailed quasi-dynamic hydraulic model of its water supply network. First, it is presented to the village itself and its location. Then they are described all the objects that are located on water network in the village. These objects include source water, water treatment plant and water tank Velký Beranov Nový.

In the work is described also the procedure of making the model and the data, which was for his creation needed. In the framework of the calibration of the hydraulic model was carried out a measurement campaign in water supply net. From the data, which was during the measurement campaign obtained, was carried out the calibration, for this step it was used the method of least squares. Subsequently, the hydraulic model was verified.

On the basis of the created hydraulic model have been assessed, the pressure ratios on the existing water supply network. Examined were the maximum and minimum pressures. The assessment was carried out according to the decree of the 428/2001 Sb. It was found that some parts of the water network do not meet the minimum pressures given by the decree and have a pressure less than 0.15 MPa.

Due to the presence of low pressures that have been on the water supply network are identified, and with regard to the prospective development the master plan of the village of Velký Beranov, there were suggested measures to increase the pressure. Subsequently, an assessment was carried out pressures of the water including the proposed action. I managed to achieve all the set goals. As follows assembled and functioning hydraulic model will serve in the operation of the existing water supply network.